

Avdelningen för Byggnadsfysik

Examensarbete TVBH-5099

Lund 2018

Energiutvärdering av slitsade stålreglar i utfackningsväggar

Maria Thörnqvist
Katharina Rud Olson



LUND
UNIVERSITY

Energiutvärdering av slitsade stålreglar i utfackningsväggar

Maria Thörnqvist
Katharina Rud Olson

© Maria Thörnqvist & Katharina Rud Olson
ISRN LUTVDG/TVBH-18/ 5099--SE(63)

Avdelningen för Byggnadsfysik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
22100 LUND

Förord

Detta examensarbete har genomförts som det avslutande momentet på vår civilingenjörsutbildning inom Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet skrevs i samarbete med Skanska Sverige AB, Teknik, under sen höst 2017 samt tidig vår 2018 och omfattar 30 högskolepoäng.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare på LTH, Petter Wallentén som varit en fantastisk stöttepelare under detta arbete och bidragit med kunskap, vägledning och inspiration. Tack för allt stöd och handledning.

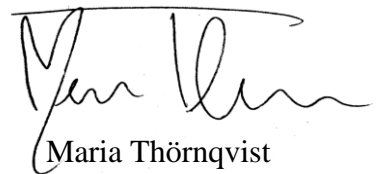
Ytterligare ett tack vill vi rikta till Sigfrid Lindén Johansson, vår handledare på Skanska AB, som med ett stort engagemang och intresse bidragit med viktiga synpunkter till arbetet.

Vi vill även tacka deltagarna i intervjuerna, samt övriga som bidragit med sin tid och kunskap för att göra detta arbete möjligt.

Malmö, februari 2018



Katharina Rud-Olson



Maria Thörnqvist

Sammanfattning

- Titel:** Energiutvärdering av slitsade stålreglar i utfackningsväggar
- Författare:** Katharina Rud-Olson, Maria Thörnqvist
- Handledare:** Petter Wallentén, Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola
Sigfrid Lindén Johansson, Skanska Sverige AB
- Examinator:** Lars-Erik Harderup, Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola
- Bakgrund:** Inom dagens byggsektor ställs det allt högre krav på att byggnader ska vara energieffektiva, dels under uppförandet dels under brukstiden. Detta innebär att noggrannheten och precisionen i energiberäkningar som genomförs innan byggnaden uppförs måste vara hög för att säkerställa att kraven uppfylls. Inom flertalet områden har det utförts ett antal studier för att få fram säkra beräkningsmetoder men det finns fortfarande områden där kunskapen är bristfällig och informationen som finns tillgänglig är otillräcklig. I utfackningsväggar, icke bärande ytterväggar, är slitsade stålreglar vanligt förekommande, vilket är ett av de områden som kräver ytterligare utredning. Värmeflödet genom en slitsad stålregelkonstruktion utgör ett komplext tredimensionellt problem som har visats svårt att överföra i en hanterbar modell. I dagsläget förlitar sig entreprenörer på den information som finns tillgänglig hos leverantören men i och med de skärpta kraven finns det en önskan om att detta skall utredas vidare.
- Problemformulering:** Vilka parametrar påverkar främst värmeflödet genom en vägg med slitsade stålreglar?
Är det möjligt att förenkla beräkningen av värmeflödet genom en slitsad stålregelvägg baserat på tredimensionella simuleringar?
Hur väl stämmer dagens beräkningsmetoder överens mot tredimensionella simuleringar?
- Syfte:** Det övergripande syftet med arbetet är att sammanställa den generella kunskap som finns att tillgå i branschen idag rörande slitsade stålregelytterväggar samt utreda hur U-värdesberäkningar för dessa väggar bör behandlas i framtiden.

Metod:

Arbetet inleddes med en förstudie där data samlades in genom intervjuer, dessa tillsammans med en litteraturstudie låg sedan till grund för huvudstudien. Huvudstudien inleddes med en parameterstudie för att utreda vilka parametrar som har störst inverkan på värmeflödet i en slitsad stålregelkonstruktion. Tredimensionella simuleringar genomfördes med programmet HEAT3 där varje parameter varierades enskilt. Studien övergick sedan i en olinjär regressionsanalys för att ta fram en förenklad beräkningsmetod. De simulerade tredimensionella modellerna användes som grund för att anpassa U-värdesmetoden för slitsade stålregelkonstruktioner. Arbetet avslutades med en studie kring hur dagens beräkningsmetoder och leverantörernas presenterade värmeflöden förhåller sig till tredimensionella simuleringar.

Slutsats:

Av de parametrar som undersöktes visade sig alla ha en inverkan på värmeflödet, men i olika grad. Den första som hade stor inverkan var typen av slits, där parameterstudien visade att en regel med skurna slitsar har ett högre värmeflöde än en stansad regel. Utöver detta var det främst fasadskivan som hade störst inverkan på värmeflödet, speciellt då det tillkommer en fasadskiva på en regelvägg som inte haft en fasadskiva innan. Den parameter som påverkade värmeflödet minst var godstjockleken, godstjockleken var även den enda av parametrarna som visade ett linjärt beteende.

Regressionsanalysen resulterade i tre olika U-värdesformler, alla med olika koefficienter för att ta hänsyn till stålregelns beteende. Analysen visade att det krävdes en formel för primärregeldimensioner mellan 170-195 mm, en formel för primärregeldimensionen 220 mm samt en formel för primärregeldimensionen 250 mm. Utöver detta tillkom även en del begränsningar, den mest centrala att fasadskivan måste vara minst 30 mm.

Jämförelsen mellan en vägg med slitsade stålreglar och en vägg med träreglar visade att värmeflödet genom en slitsad stålregel, oavsett typ av slits, alltid är högre. Hur mycket träregelns värmeflöde skiljer sig från stålregelns varierar både med typen av slits samt väggens uppbyggnad, men uppgick maximalt till 17 % för de fallen i parameterstudien för reglar med skurna slitsar.

Jämförelsen mot leverantörerna visade att Europrofilens redovisade värden stämmer mycket väl överens med de tredimensionella simuleringarna genomförda i HEAT3. Jämförelsen mot Gyproc visar inte samma låga felmarginal, för Gyprocs reglar skiljer sig de redovisade värdena mot simuleringarna i mycket större utsträckning än i jämförelsen mot Europrofil.

Nyckelord:

Slitsade stålreglar, stål, värmegenomgångskoefficient, U-värde, värmeflöde, HEAT, energiberäkningar, utfackningsvägg

Abstract

- Title:** Energy evaluation of slotted steel studs in curtain walls
- Author:** Katharina Rud-Olson, Maria Thörnqvist
- Supervisor:** Petter Wallentén, Department of Building Physics, Faculty of Engineering Lund University
Sigfrid Lindén Johansson, Skanska Sverige AB
- Examiner:** Lars-Erik Harderup, Department of Building Physics, Faculty of Engineering Lund University
- Background:** Within the construction sector buildings are required to be more energy efficient than ever before. This means that energy calculations, predicting the energy consumption, have to be increasingly more accurate to ensure that the requirements are met. Research has presented results in sufficient methods of calculation but in certain areas the knowledge is inadequate and require further investigation. One of these areas are constructions with slotted steel studs. The thermal transmittance through a slotted steel stud creates a complex three-dimensional problem which has been proved difficult to transfer into a more manageable model. Today's energy engineers trust the information supplied by manufacturers but due to the new prerequisite there is a desire for further investigations.
- Research question:** Which main parameters affect the thermal transmittance through constructions with slotted steel studs?
Is it possible to simplify the calculation for the thermal transmittance through a slotted steel stud based on three-dimensional simulations?
How well does today's calculation methods compare to three-dimensional calculations?
- Purpose:** The general purpose of this thesis is to compile the knowledge available within the construction sector today concerning slotted steel studs as well as analyze how the problem should be approached in the future.
- Method:** The research began with a pilot study where the data was collected through interviews. The pilot study and a literature review acted as the base for the rest of the investigation. The main study was initiated with a parameter study to investigate which parameters

have the largest impact on the thermal transmittance for a slotted steel stud construction. Simulations with a three-dimensional heat flow software, HEAT3, were compiled, where each of the parameters were varied separately. To find a simplified method of calculation a non-linear regression analysis was conducted. Simulated three-dimensional models were used to obtain a regression model based on the U-value method. The final part of the investigation analyzed how today's method of calculation, as well as how the manufacturer's presented heat flows compares to three-dimensional models.

Conclusion:

All the parameters that were studied had an influence on the heat flow but a few showed a more significant influence, the first one being the type of slot. The parameter study showed that a stud with flanged slots had a higher thermal transmittance than a stud with stamped slots. Furthermore, it was the cavity wall insulation which had the largest influence on the thermal transmittance, especially when the insulation was added onto a wall that previously had no cavity insulation at all. The parameter that had the least influence was the metal stud thickness, it was also the only parameter that showed a linear relationship with the heat transfer.

The regression analysis resulted in 3 different U-value formulas, all with different coefficients which consider the behavior of the steel stud. The analysis showed that one formula was needed for the stud dimensions 170-195 mm, another formula for 220 mm and a third formula for the stud dimension 250 mm. Additionally, a few limitations were necessary the most critical one being that the cavity wall insulation has to be a minimum of 30 mm for the formula to be applicable.

The comparison between a wall with slotted steel studs and a wall with wooden studs showed that the thermal transmittance is higher for the steel stud, regardless of the type of slot. The deviance between the wooden stud and the steel stud was dependent on both the type of slot, as well as how the wall was constructed. The flanged steel stud displayed a maximum deviation of 17 % from the wooden stud.

The comparison between the manufacturers showed that Europrofil's tabulated values had a very small margin of error. Whereas Gyproc had a significantly larger deviation from the three-dimensional simulations.

Keywords:

Slotted steel stud, steel, thermal transmittance, U-value, heat flow, HEAT, energy calculations

Innehållsförteckning

Beteckningar	1
1. Inledning	3
1.1 Bakgrund	3
1.2 Syfte och mål	3
1.3 Problemformulering.....	4
1.4 Avgränsningar.....	4
1.5 Metodik	4
2. Teori	5
2.1 Värmetransport genom material.....	5
2.1.1 Ledning	5
2.1.2 Konvektion	6
2.1.3 Strålning.....	7
2.1.4 Värmeegenomgångskoefficient/U-värde	8
2.2 ISO-standarder	10
2.3 Regressionsanalys.....	11
2.4 HEAT2 & HEAT3	12
2.5 Stål som byggnadsmaterial	13
2.5.1 Stålprofiler.....	13
2.6 Tidigare studier	14
2.7 Leverantörer	16
3. Förstudie	19
3.1 Intervjumetodik	19
3.1.1 Standardisering & strukturering	19
3.1.2 Registrering & sammanställning.....	19
3.2 Resultat	20
3.2.1 Fallföretag 1	20
3.2.2 Fallföretag 2.....	21
3.3 Slutsatser från förstudien	21
4. Metodik för huvudstudien	23
4.1 Parameterstudie.....	23
4.1.1 Godstjocklek	23
4.1.2 Regeldimension	24
4.1.3 Installationsskikt.....	24
4.1.4 Fasadskiva.....	24
4.1.5 Slitstyp	24
4.1.6 Studiens basfall.....	25
4.2 HEAT3-modell	27
4.3 U-värdesformel	29
4.4 Jämförelse med trä	32
5. Resultat & Analys	33
5.1 Parameterstudie.....	33

5.1.1	Godstjocklek	33
5.1.2	Regeldimensionen	34
5.1.3	Installationsskikt.....	35
5.1.4	Fasadskiva.....	36
5.2	U-värdesformel	37
5.2.1	Regressionsanalysens koefficienter	37
5.2.2	U-värdesformelns resultat och begränsningar	38
5.3	Jämförelse mot leverantör.....	39
5.4	Jämförelse mot träreglar	41
5.4.1	Regeldimensionen	41
5.4.2	Installationsskikt.....	42
5.4.3	Fasadskiva.....	43
6.	Diskussion	45
6.1	Parameterstudien.....	45
6.2	U-värdesformeln	45
6.3	Jämförelse mot leverantörer.....	47
6.4	Jämförelse mot träreglar	47
6.5	Noggrannhetsanalys	48
6.5.1	HEAT3 modell.....	48
6.5.2	U-värdesformeln	49
6.6	Felkällor	50
7.	Slutsatser	53
7.1	Fortsatta studier	54
8.	Referenser.....	57

Bilaga 1

Bilaga 2

Beteckningar

Beteckning	Förklaring	Enhet
a	Värmediffusivitet	[m ² /s]
c	Specifik värmekapacitet	[J/kg·K]
c/c	Centrumavstånd	[mm]
q_s	Värmefflöde pga. strålning	[W/m ²]
q_k	Värmefflöde pga. konvektion	[W/m ²]
q_l	Värmefflöde pga. ledning	[W/m ²]
R	Värmemotstånd	[m ² ·K/W]
R_{si}	Övergångsmotstånd inomhus	[m ² ·K/W]
R_{se}	Övergångsmotstånd Utomhus	[m ² ·K/W]
r^2 / R^2	Korrelationskoefficient för linjär/olinjär regression	[-]
T	Temperatur	[K eller °C]
t	Godstjocklek	[mm]
U	Värmegenomgångskoefficient/U-värde	[W/m ² ·K]
α_s	Värmegenomgångskoefficient pga. strålning	[W/m ² ·K]
α_k	Värmegenomgångskoefficient pga. konvektion	[W/m ² ·K]
ε	Emittans	[-]
λ	Värmeledningsförmåga/Värmekonduktivitet	[W/m·K]
λ_{ekv}	Ekvivalent värmeledningsförmåga	[W/m·K]
ρ	Densitet	[kg/m ³]
σ_s	Stefan - Boltzmanns konstant	[W/m ² K ⁴]

1. Inledning

Detta inledande kapitel syftar till att ge en överblick och bakgrund till studien som presenteras i rapporten. Det tar även upp målet, syftet och problemformuleringarna för studien, samt dess avgränsningar och en kort beskrivning av metodiken.

1.1 Bakgrund

Inom dagens byggsektor ställs det allt högre krav på att byggnader ska vara energieffektiva, dels under uppförandet men också under brukstiden. Boverkets byggregler, BBR, uppdateras ständigt med skärpta energikrav som byggherrar måste förhålla sig till. Detta innebär att noggrannheten och precisionen i energiberäkningar som utförs innan byggnaden uppförs behöver vara hög för att säkerställa att kraven uppfylls. Inom flertalet områden har det genomförts ett antal utredningar för att få fram säkra beräkningsmetoder men det finns fortfarande områden där kunskapen är bristfällig och informationen som finns tillgänglig för branschen är otillräcklig.

Slitsade stålreglar är idag en vanligt förekommande byggkomponent i framförallt utfackningsväggar. Utfackningsväggar, det vill säga icke-bärande ytterväggar, används vanligen då de ger en slank konstruktion med hög isolerförmåga och blir därmed energieffektivare än bärande ytterväggar. En utfackningsvägg utformas vanligtvis med en stomme i trä eller stål, där slitsade stålreglar är vanligt förekommande i stålregelkonstruktionen. Det saknas dock noggranna utredningar för dessa vilket gör energiberäkningarna osäkra då värmeflödet genom en slitsad stålregelkonstruktion utgör ett komplext tredimensionellt problem som har visats svårt att överföra till en förenklad modell. Därav finns en önskan att detta skall utredas vidare.

1.2 Syfte och mål

Det övergripande syftet med arbetet är att sammanställa den generella kunskap som finns att tillgå i branschen idag rörande slitsade stålregelkonstruktioner samt utreda hur ämnet bör behandlas i framtiden vid beräkning av värmetransporten genom väggen, det vill säga U-värdet. Målet och förhoppningen är att resultatet och slutsatserna ska öka kunskapen inom området och vara användbara vid energiberäkningar för projekt där slitsade stålreglar används.

1.3 Problemformulering

Utifrån bakgrund och syfte har följande problemformuleringar tagits fram

- Vilka parametrar påverkar främst värmeflödet genom en vägg med slitsade stålreglar?
- Är det möjligt att förenkla beräkningen av värmeflödet genom en slitsad stålregelvägg baserat på tredimensionella simuleringar?
- Hur väl stämmer dagens beräkningsmetoder överens mot tredimensionella simuleringar?

1.4 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till att endast analysera yttervägg med stålreglar, hänsyn tas ej till övriga köldbryggor. Vid analys av U-värdet för ytterväggen är varken kortlingar, hammarband eller syll medräknade. I beräkningarna tas hänsyn till ledning och i viss mån strålning och konvektion i materialen. Det ska även tilläggas att inga mätningar av verkliga värmeflöden har genomförts, de energiflöden som har tagits fram har endast simulerats i ett tredimensionellt beräkningsprogram.

1.5 Metodik

Arbetet inleds med en förstudie i form av intervjuer i syfte att sammanställa hur energiingenjörer och byggnadsfysiker i dagsläget utför beräkningar för en slitsad stålregelkonstruktion. Förstudien tillsammans med en litteraturstudie ligger sedan till grund för huvudstudien.

Huvudstudien genomförs delvis i simuleringsprogrammet HEAT3, där värmegenomgångstalet för olika typer av flerskiktsväggar med en stomme av slitsade stålreglar beräknas.

För att åskådliggöra vilka parametrar som främst påverkar värmeflödet i en slitsad stålregelvägg utförs en parameterstudie. Denna har utgångspunkt i ett basfall som utformas med stöd från energiingenjörer samt data från återförsäljare. De olika parametrarna varieras i ett antal HEAT3-modeller och resultatet sammanställs sedan för att visa hur parametrarna påverkar värmeflödet.

Den andra delen av studien syftar till att ta fram en förenklad beräkningsmetod i form av en U-värdesformel där de ingående parametrarna bestäms utifrån resultatet i parameterstudien. Detta genomförs med hjälp av olinjär regressionsanalys som anpassar U-värdesmetoden mot HEAT3-simuleringarna med hjälp av koefficienter.

2. Teori

I detta kapitel redogörs för den aktuella kunskap som finns att tillgå inom ämnesområdet idag, i form av en litteraturstudie, som ligger till grund för den fortsatta studien.

2.1 Värmetransport genom material

Värmetransport uppstår så snart det finns en temperaturskillnad mellan olika positioner i rummet, en strävan att åstadkomma jämvikt leder till att ett värmeutbyte uppstår mellan positionerna (Sandin 2010). I en byggnadsdel, såsom en yttervägg för ett hus, sker detta främst på grund av att utomhustemperaturen i Sverige större delen av året är lägre än den önskade inomhustemperaturen. Detta leder till att värmen inomhus rör sig utåt för att hamna i jämvikt med luftens temperatur utomhus. Denna transport av värme kan ske på tre huvudsakliga vis; *ledning*, *konvektion* eller *strålning* (ibid.).

2.1.1 Ledning

Värmeledning genom ett material uppstår på grund av temperaturskillnader inom eller runt materialet vilket leder till en överföring av energi mellan molekyler, detta sker överallt i konstruktioner och i praktiken sker det i tre dimensioner. Värmeledningen i ett material med konstant värmeledningsförmåga kan beräknas enligt Formel (2.1) (Nevander & Elmarsson 2006).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

Där

x, y, z = längdkoordinater i respektive riktning [m]

$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ = värmediffusivitet [m²/s]

Formel (2.1) kan vara komplicerad att lösa och kräver då någon typ av beräkningsprogram, som vanligen löser differentialekvationen med en numerisk metod. I denna studie har

beräkningsprogrammet HEAT3 använts, mer gällande detta återfinns i Avsnitt 2.4. Det är dock ofta tillräckligt med en endimensionell analys av värmeflödet genom klimatskalet. Värmeledningen för Formel (2.1) får då ett utseende enligt Formel (2.2), som dessutom avser ett stationärt fall, alltså då flödet genom klimatskalet är konstant (Nevander & Elmarsson 2006).

$$q_l = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{d} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.2)$$

Där

d = tjocklek på materialet i värmeflödets riktning [m]

$T_1 - T_2$ = temperaturskillnaden över materialet [K]

Formel (2.2) förutsätter att temperaturfördelningen över materialet är linjär. En vägg är vanligen uppbyggd av ett antal olika skikt, där varje skikt då får en egen temperaturfördelning utifrån dess värmeledningsförmåga, λ , tjocklek, d , och temperaturskillnad, $T_1 - T_2$ (Sandin 2010).

Vissa material leder värme sämre än andra, detta är beroende av materialets värmekonduktivitet. Mineralull har exempelvis en värmekonduktivitet i storleksordningen $\lambda = 0,036 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ medan stål har $\lambda = 60 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Det innebär att mineralull isolerar betydligt bättre än stål (Sandin 2010). En lista över riktvärden för ett antal olika materials värmekonduktivitet återfinns i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 Exempel på olika materials värmekonduktivitet. (Sandin, K 2010).

Material	Värmekonduktivitet, λ [W/m · K]
Aluminium	200
Stål	60
Betong	1,7
Gips	0,22
Trä	0,14
Mineralull	0,033–0,040
Stillastående Luft	0,026

2.1.2 Konvektion

Konvektion definieras som den värmetransport som uppstår när ett medie rör sig. För byggnadsdelar är luft ofta mediet man syftar till, luft strömmar förbi en varm kropp och för med sig värme från ytan av den varma kroppen till ytan av den kallare kroppen. Konvektion kan uppstå på två sätt, antingen genom *egenkonvektion* eller genom *påtvungad konvektion* (Nevander & Elmarsson 2006). Värmetransport på grund av konvektion beräknas enligt Formel (2.3).

$$q_k = \alpha_k \cdot (T_y - T_l) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.3)$$

Där

α_k = värmeövergångskoefficient pga konvektion [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

T_y = yttemperatur [K]

T_l = lufttemperatur [K]

Värmeövergångskoefficienten, α_k , beror främst på lufthastigheten vid ytan som i sin tur beror på om det är egenkonvektion eller påtvingad konvektion som ger upphov till luftrörelsen. Egenkonvektion påverkas främst av temperaturskillnader mellan luft och ytor inom en volym. Detta kan exempelvis uppstå på insidan av ett fönster, där fönsterglasets kalla yta kyler ner luften intill fönstret och ändrar dess densitet, vilket ger upphov till luftrörelser (Sandin 2010). Vid påtvingad konvektion ger även strömningshastigheten inverkan på värmeövergångskoefficienten. Om luftrörelserna uppstår på grund av en yttre påverkan, såsom vind eller en fläkt benämns det påtvingad konvektion. Påtvingad konvektion kan till exempel uppstå i en ventilerad luftspalt i en flerskiktsvägg där vindtrycket skapar luftrörelsen (ibid.).

2.1.3 Strålning

Mellan ytor med olika temperatur sker utöver konvektion och ledning även ett strålningsutbyte där det uppstår en värmetransport från den varma ytan till den kalla. Detta sker exempelvis i en luftspalt i en flerskiktsvägg, mellan den yttre och den inre glasrutan i ett fönster eller när solen strålar mot en fasad (Petersson 2013). Strålning som faller mot en kropp eller yta kan antingen *reflekteras*, *absorberas* eller *transmitteras*. Summan av dessa tre delar bildar den totala infallande strålningen mot ytan, vilket leder till sambandet i Formel (2.4) som gäller för parallella ytor. Reflektans, absorptans och transmittans betecknas ρ , α och τ där transmittansen generellt är 0 för de flesta byggnadsmaterial, undantag gäller för transparenta material såsom glas (Sandin 2010).

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.4)$$

I byggsammanhang skiljer man ofta på två typer av strålning. Den första typen är solstrålning eller dagsljustrålning mot byggnader, där solen är strålningskällan och strålningen benämns kortvågig, med en våglängd på 380–780 nm (Petersson 2013). Hur denna strålning påverkar byggnadens värmeledning avgörs av kulören på fasaden och i vilken riktning huset är placerat, vilket bestämmer infallsvinkeln och solstrålningens intensitet på väggen. En fasad i söder är exempelvis betydligt mer utsatt för solstrålning än en fasad i norr. Utöver detta spelar även vädret och årstiden roll, en molnig dag bidrar till mindre strålning än en helt klar dag.

Den andra typen är strålning mellan ytor vid temperaturer omkring 20 °C, det är främst denna som är väsentlig för värmeledningen inom byggnadsdelar. Då temperaturen här är lägre blir strålningen långvågig, med våglängden >2500 nm, kulören på ytan som strålar har till skillnad från kortvågig strålning ingen inverkan (Sandin 2010). Värmestrålningen mellan två parallella ytor beskrivs av Formel (2.5).

$$q_s = \alpha_s \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.5)$$

$$\alpha_s = 4 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma_s \cdot T_m^3 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Där

ε_{12} = resulterande emittans [-]

$\sigma_s = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Stefan – Boltzmanns konstant [W/m² · K⁴]

$$T_m = \frac{T_1 - T_2}{2} \text{ [K]}$$

Emittansen beskriver hur stor del av strålningen som absorberas respektive reflekteras. För de flesta material ligger denna kring 0,9, vilket innebär att 90 % av strålningen absorberas och 10 % reflekteras. För blanka metaller är den dock betydligt lägre, cirka 0,1 (Nevander & Elmarsson 2006). Vid strålning mellan två parallella ytor (yta 1 och 2) beräknas emittansen för Formel (2.5) enligt Formel (2.6), utseendet för denna formel förändras dock då antalet ytor samt dess placering till varandra varierar.

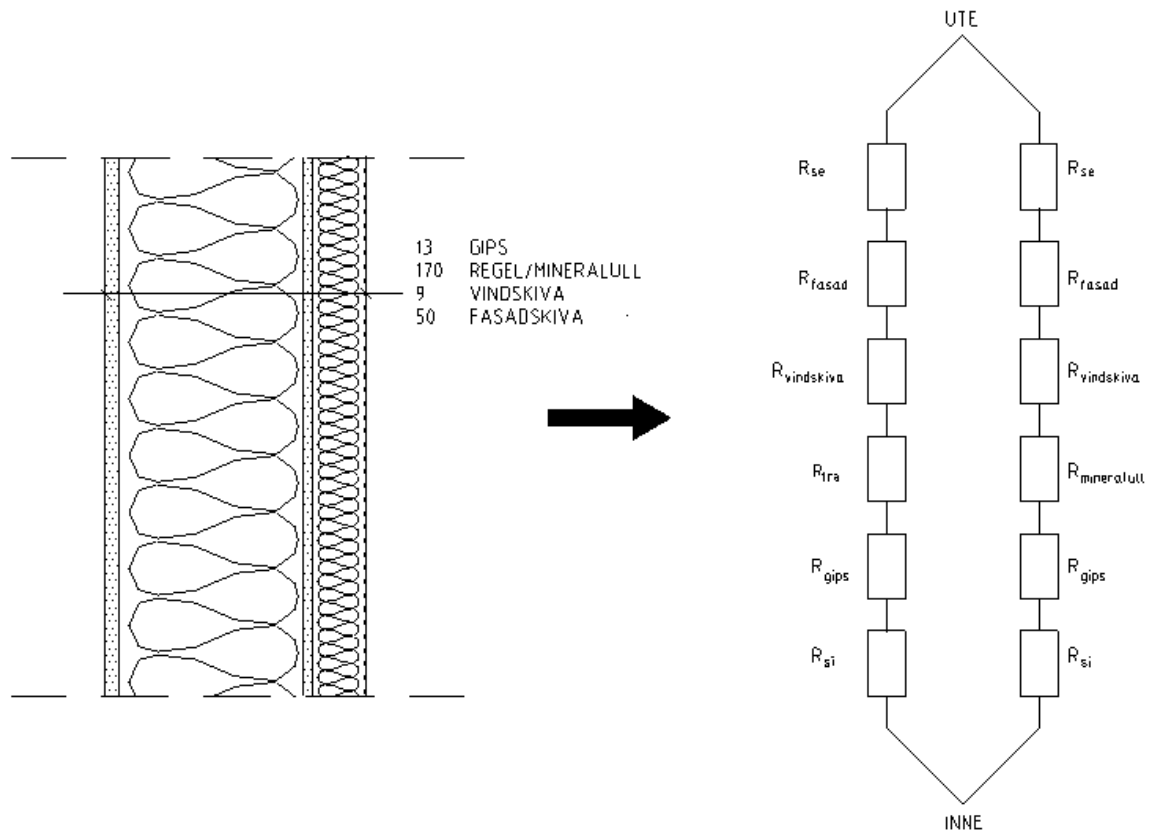
$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \text{ [-]} \quad (2.6)$$

2.1.4 Värmegenomgångskoefficient/U-värde

I praktiken sker värmetransport i byggnadsdelar på alla tre sätt, ledning, strålning och konvektion. För att ta hänsyn till detta används begreppet värmegenomgångskoefficient eller U-värde, definierad som den värmeeffekt som transporteras genom en byggnadsdel från inneluft till uteluft vid en viss temperaturskillnad (Sandin 2010). Värmegenomgångskoefficienten kan genom handberäkningar tas fram på två sätt, antingen genom U-värdesmetoden, vilken underskattar värmetransporten, eller genom λ -värdesmetoden, vilken överskattar värmetransporten. Medelvärde av dessa två metoder är det värde som anses mest rimligt (Sandin 2010).

U-värdesmetoden

U-värdesmetoden baseras på att värmetransporten genom väggen delas in i olika flödesvägar, där varje väg bidrar med en andel av den totala värme som transporteras genom väggen. Om ett skikt i en byggnadsdel är inhomogent, uppbyggt av olika material, såsom regler och isolering antas värmen ha två vägar att flöda (Sandin 2010). Antingen genom isoleringen eller genom regeln. Detta visas schematiskt i Figur 2.1, här på en träregelvägg uppbyggd av 4 skikt varav endast ett är inhomogent. Detta resulterar i två flödesvägar för värmen.



Figur 2.1 U-värdesmetoden

Varje skikt i väggen har ett värmemotstånd, R , vilket beskriver skiktets isoleringsförmåga. Detta värmemotstånd beror av skiktets tjocklek, d , samt skiktets värmeledningsförmåga, λ , (Sandin 2010) och uttrycks med Formel (2.7). Om ett skikt befinner sig i direkt kontakt med luft eller en annan gas och har ett strålningsutbyte med en motstående yta, tillkommer ett motstånd på grund av konvektion och strålning, vilket beräknas enligt Formel (2.8). Exempel på detta är övergångsmotstånden mot insidan och utsidan av väggen som enligt Sandin (2010) uppgår till $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ och $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

$$R_l = \frac{\lambda}{d} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (2.7)$$

$$R_{ks} = \frac{1}{\alpha_s + \alpha_k} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (2.8)$$

När motståndet för varje flödesväg beräknats måste även flödesvägens andel av det totala värmeflödet beräknas. Areaandelen, β_s , beräknas genom att ta fram hur stor andel av det inhomogena skiktet i väggen som är uppbyggt av respektive material. Ett standardfall är enligt Sandin (2010) att reglarna uppgår till ca 10 % av stomskiktet för en träregelkonstruktion. Adderas även kortlingar, hammarband och syll ökar träandelen för skiktet till 14 %, resterande del av skiktet består av isolering, vars andel då blir 86 %.

För att beräkna byggdelen totala värmegenomgångsmotstånd summeras och inverteras motstånden för varje flödesväg för att sedan multipliceras med respektive areaandel, detta resulterar i Formel (2.9).

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \sum_{s=1}^k \beta_s \cdot \left(\frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}} \right)_s \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad (2.9)$$

Där

R_{si} = värmeövergångsmotstånd inomhus [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

R_{se} = värmeövergångsmotstånd utomhus [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

$\sum_{i=1}^n R_i$ = summerat värmemotstånd för alla skikt i , i flödesvägen [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

n = antalet skikt i flödesvägen [-]

k = antalet flödesvägar genom byggnadsdelen [-]

β_s = areaandel för flödesväg s [-]

λ -värdesmetoden

En andra metod för att beräkna värmeövergångskoefficienten är λ -värdesmetoden. I motsats till U-värdesmetoden som förutsätter ett endimensionellt flöde så antas istället en oändlig värmeledningsförmåga parallellt i väggen vid λ -värdesmetoden (Sandin 2010). Detta innebär att varje inhomogent delskikt, med dess ingående komponenter, slås samman till ett material med ett viktat λ -värde. Det viktade λ -värdet beräknas enligt Formel (2.10) och används sedan på vanligt vis i Formel (2.9), som då enbart får en flödesväg. Denna metod ger i motsats till U-värdesmetoden en överskattning av värmegenomgångskoefficienten.

$$\lambda_{med} = \beta \cdot \lambda_1 + (1 - \beta) \cdot \lambda_2 \quad (2.10)$$

Där

β = andel material av λ_1

$1 - \beta$ = andel material av λ_2

2.2 ISO-standarder

För att få enhetlighet i energiberäkningarna och öka kvaliteten har myndigheten Swedish Standard Institute (SIS) tillsammans med aktiva inom branschen tagit fram ISO-standarder.

Enligt SIS (2017a) är inte U-värdesmetoden och λ -värdesmetoden, nämnda i avsnittet ovan, applicerbara på byggnadsdelar med genomgående material i metall. Detta då regelandelen i en stålregelvägg är väldigt liten, samt att stålets värmeledningsförmåga är väldigt hög i förhållande till intilliggande material. Standarden, ISO 6946 (SIS 2017a), anger även att förhållandet mellan de totala motstånden för byggnadsdelen, R_{tot} , beräknat enligt U-värdesmetoden och λ -värdesmetoden, maximalt får uppgå till 1,5 för att de förenklade beräkningsmetoderna ska vara

applicerbara. Det maximala felet som kan uppkomma om begränsningarna som nämns ovan appliceras är 20 % (SIS 2017a).

I dagsläget finns det ingen förenklad beräkningsstandard för U-värdesberäkningar för byggnadsdelar med genomgående metall. Den standard som hänvisas till gällande genomgående metall i byggnadsdelar menar på att en datorsimulering bör genomföras, där en analys av noggrannheten i modellen bör tas fram för att visa på dess trovärdighet (SIS 2017b). Enligt ISO 10211 (SIS 2017b) får skillnaden i värmefflöde för modellen uppgå maximalt till 1 % när antalet noder i datorsimuleringens rutnät fördubblas. Utöver detta bör resultatet presenteras med två värdesiffror om det är det slutliga resultatet, om resultatet istället presenteras för att användas som exempelvis indata ska det presenteras med tre värdesiffror (SIS 2017a).

Vid beräkning av värmefflödet genom konstruktioner som har en väl ventilerad luftspalt anger ISO 6946 (SIS 2017a) att det yttre övergångsmotståndet, R_{se} , kan ersättas med det inre övergångsmotståndet, R_{si} . Skikten utanför luftspalten kan då plockas bort ut modellen, detta på grund av att temperaturen i luftspalten är densamma som utomhustemperaturen.

2.3 Regressionsanalys

Regressionsanalys är verktyg för att ta fram förhållanden inom en datamängd och dess olika variabler, ofta förhållandet mellan beroende- och oberoende variabler. En regressionsmodell kan göras mer eller mindre komplex men innebär alltid att en datamängd anpassas till en funktion där målet är att avvikelsen från datamängden ska vara så liten som möjligt (Berk 2004). Vilket genomförs genom att minimera felfunktionen i Formel (2.11). Regressionsanalys används vanligen vid prognostisering i ett försök att förutsäga den beroende variabelns beteende när de oberoende variablerna varierar. En regressionsanalys kan genomföras på ett antal olika vis; linjär, logaritmisk, multipel samt andra olinjära förhållanden. Typen av regression som passar bäst för datamängden visar på förhållandet mellan variablerna (ibid).

En av de mer komplicerade typerna av regressionsanalys är den som behandlar olinjära förhållanden. Sambandet mellan variablerna är då svårare att bestämma och lika så noggrannheten av analysen. I största möjliga mån bör en linjär analys genomföras först som en kontroll för att sedan, om nödvändigt, övergå till en olinjär analys (Berk 2004).

$$F = \sum (y - y_{anpassning})^2 \quad (2.11)$$

Måttet på hur väl regressionen passar mot datamängden kallas korrelationskoefficient, betecknat r^2 för linjär och R^2 för olinjär regressionsanalys. Formlerna för beräkningen av dessa presenteras i Formel (2.12) och Formel (2.13). Korrelationskoefficienten antar alltid ett värde mellan 0 och 1, där ett värde nära 0 visar på att det inte finns något förhållande (korrelation)

mellan de oberoende variablerna och den beroende variabeln, medan ett värde nära 1 innebär att funktionen är väl anpassad till datamängden (Brown 2000).

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(y - y_{medel})^2}{\sum(y^2) - \frac{\sum(y)^2}{n}} \quad (2.12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - y_{anpassning})^2}{\sum(y - y_{medel})^2} \quad (2.13)$$

Där

y = värdet från datamängden

$y_{anpassning}$ = det anpassade värdet utifrån regressionsanalysen

y_{medel} = medelvärdet av datamängden

n = antalet mätpunkter

2.4 HEAT2 & HEAT3

HEAT2 och HEAT3 är beräkningsprogram för två- respektive tredimensionella beräkningar av värmeflödet genom konstruktioner. Programmen används för att beräkna värmeflödet vid köldbryggor, fönsteranslutningar, från vägg till platta på mark för att nämna några exempel (Blomberg 2001). Det är även möjligt att beräkna yttemperaturer, temperaturgradienter och U-värden, med begränsningen att det enbart kan hantera modeller som är parallella med de två respektive tre geometriska axlarna x och y samt x , y och z (Blomberg 1996). Genom att justera noggrannheten efter hur komplext problemet är går det att få ett bättre resultat men på bekostnad av att simuleringen tar längre tid att genomföra. Programmen hanterar både stationära och icke stationära förhållanden med hjälp av framåtdifferensmetoden. Det är även möjligt att lägga till egna och redigera befintliga material samt att ladda upp flera typer av klimatfiler (Blomberg 2000).

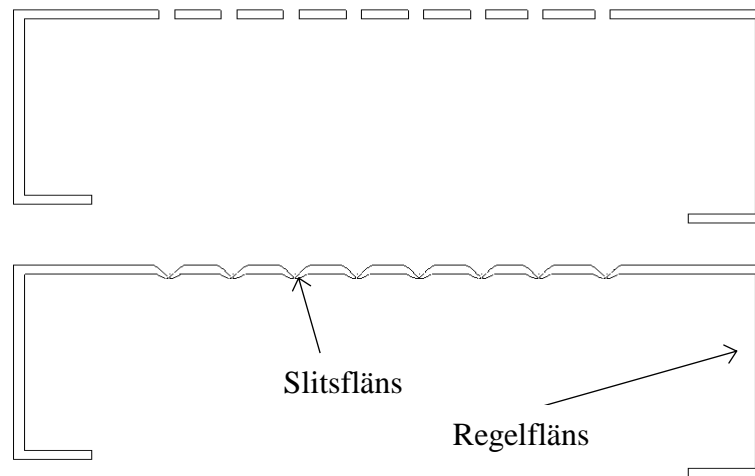
ISO 10211 (SIS 2017b) hanterar de detaljerade beräkningarna av köldbryggor, värmeflöden och yttemperaturer i byggnadskonstruktioner. HEAT2 kan hantera två av de fallen som presenteras i standarden medan HEAT3 klarar kraven för alla fyra fallen och är därmed godkänt att använda vid dessa beräkningar (Buildingphysics u.å.). HEAT3 har även funktionen att det själv anpassar noggrannheten så att beräkningen klarar kraven enligt *ISO 10211* (SIS 2017b).

2.5 Stål som byggnadsmaterial

Stål har inte en lika lång historia som exempelvis trä inom byggsektorn i Sverige. Det användes till en början mestadels till industribyggnad och större konstruktioner såsom broar, konsert- och varuhus. Under andra världskriget rådde sådan brist på materialet att användandet i princip dog ut, förutom till industribyggnader där stål var helt dominerande (Hedin 1993). Den profilerade plåten togs fram under 60-talet och lade därmed grunden för de moderna hallbyggnaderna i stål. Användandet i kontor och flerbostadshus kom inte förrän vid 80-talets mitt. Sedan dess har användandet ökat både vid bostadsbyggen såväl som vid brobyggen (ibid).

2.5.1 Stålprofiler

Stålprofiler tillverkas antingen av varmvalsad eller av kallvalsad plåt, där det för den kallvalsade finns utföranden där man gör hål eller slitsar i regeln (Burström 2007). Dessa slitsar kan tillverkas på olika sätt och får olika utseende beroende på metod, antingen skärs slitsarna eller så stansas de. De skurna slitsarna får en utvikt kant på baksidan av regeln, även kallad slitsfläns, och behåller samma mängd material medan de stansade slitsarna istället är släta och utgör ett hål där material har avlägsnats, se Figur 2.2 (Skoglund och Flemström 2012).

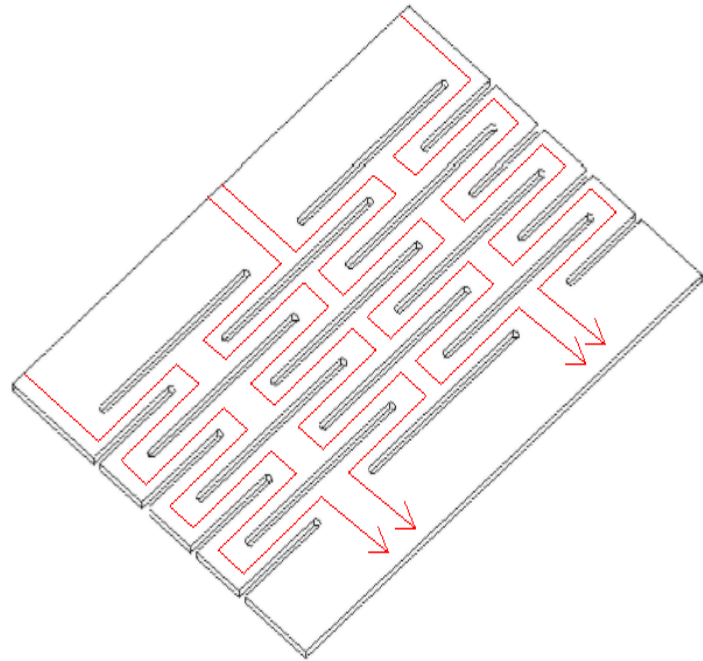


Figur 2.2 Utseende för stansade (övre) och skurna (undre) slitsar i genomskärning

Att slitsa stålprofilerna är ett sätt att minska värmeledningsförmågan genom att öka transportsträckan för värmen, se Figur 2.4, och är därför vanligt i ytterväggsreglar (Europrofil u.å.). Dessa kan vara helslitsade, som i Figur 2.2, vilka generellt används i ytterväggar eller halvslitsade, det vill säga de har hälften så många slitsrader, vilka används vid exempelvis fönsterinfästning där det krävs högre stabilitet. Stål som utsätts för fuktiga miljöer bör enligt Nevander och Elmarsson (2006) behandlas för att skyddas mot korrosion. Detta sker vanligen genom varmförzinkning och legering med andra metaller såsom nickel och krom. Stål som klassas som rostfritt får dessutom ofta en betydligt lägre värmekonduktivitet, så låg som 20 W/m·K i vissa fall, till skillnad från obehandlat stål som har en värmekonduktivitet på 60 W/m·K (Pettersson 2013).



Figur 2.3 Bild på en verklig stålregel



Figur 2.4 Värmetransport för slitsad stålregel

2.6 Tidigare studier

Det har tidigare genomförts ett fåtal studier inom ämnet som berör energiflödet i väggar med slitsade stålreglar. Dessa har dock syftat mer till att jämföra hur slitsade stålreglar förhåller sig till andra material än att djupgående utreda energiflödet i de slitsade stålreglarna, undantaget är Thomas Blombergs studie från 1996.

Skoglund och Flemström (2012) jämför i sin studie hur trä, slitsat stål samt homogent stål förhåller sig till varandra. Det nämns i rapporten att det finns olika sätt att slitsa en stålregel, skära eller stansa, men klargör inte vilken typ av slits som studeras. Beräkningarna utförs i HEAT3, hur väggen med den slitsade stålregeln valts att modelleras redovisas dock inte i rapporten. Skoglund och Flemström (2012) utför även mätningar på faktiska väggar med slitsade stålreglar som de byggt upp i labb och kan efter dessa mätningar konstatera att Hot-boxens mätvärden inte stämmer överens med beräkningarna i HEAT3. De uppmätta värdena överstiger de beräknade värdena i relativt hög grad. Detta diskuteras i rapportens slutsats, där flera möjliga felkällor i laborationen nämns, dock saknas reflektion kring hur HEAT3-modellen byggts upp. Slutsatsen från denna studie är att beräkningarna för de slitsade stålreglarna underskattar det verkliga värmefflödet i betydligt högre grad än exempelvis beräkningarna för de homogena stålreglarna. Beräkningarna som Skoglund och Flemström (2012) genomför visar även på att samtliga fall med träreglar ger ett lägre U-värde än konstruktioner med slitsade stålreglar. Skillnaden i värmefflöde för en träregelkonstruktion och en slitsad stålregelkonstruktion är dock marginell och skillnaden mellan dem minskar med en större andel isolering i väggen.

Wallgren (2016) beräknar i sin studie värmeflödet vid fönsteranslutningar i programmet COMSOL Multiphysics. Beräkningar utförs för olika regeltyper, homogena och slitsade stålprofiler samt träreglar. De slitsade stålreglar som används är Lindabs förstärkta ytterväggsreglar där slitsarna tillverkas genom stansning. För dessa beräknas en ekvivalent värmeledningsförmåga genom att modellera väggen tredimensionellt i COMSOL. I modellen bortser Wallgren (2016) från stålreglarnas flänsar och antar att slitsarna är luftfyllda. Beräkningarna utförs för två olika modeller där höjden på regeln varieras och med dessa beräkningar bestäms ett ekvivalent lambdavärde för det slitsade stålet. Det beräknade ekvivalenta λ -värdet testas sedan i en mer komplex modell med en vindskiva, ett installationsskikt samt två gipsskivor. Beräkningarna i COMSOL ger ett ekvivalent lambdavärde på $5,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ för den enkla modellen, som vid kontroll i den mer komplexa modellen ger ett fel på 0,2 % på flödet. I rapporten diskuterar Wallgren (2016) att värdet på det beräknade ekvivalenta λ -värdet har stor betydelse för värmeflödet, det genomförs dock inte ytterligare studier av hur applicerbart det ekvivalenta lambdavärdet är när konstruktionens utseende förändras.

Skaparen av beräkningsprogrammen HEAT2 och HEAT3, Thomas Blomberg, skrev doktorsavhandlingen *HEAT CONDUCTION IN TWO AND THREE DIMENSIONSONS* (1996) där delar hanterar värmeledningsberäkningar för slitsade stålreglar. I studien valde Blomberg att göra ett antal förenklingar av stålregelns utseende i modellen för simuleringarna. Den första av dessa var att regelflänsarna ansattes till samma längd, där den långa regelflänsen var dimensionerande. Blomberg utgick även från stålreglar med skurna slitsar men bortsåg från de slitsflänsar som uppstår vid tillverkningen av slitsarna. Modellen övergick då från en modell med skurna slitsar till en modell med stansade slitsar. En utgångsberäkning genomfördes i HEAT3 med ett centrumavstånd, c/c , på 600 mm mellan reglarna och en godstjocklek på 0,7 mm, beräkningarna utfördes på en 150 mm regel med omgivande isolering samt två utanpåliggande gipsskivor. Därefter beräknades flödet för väggen utan stålreglar för hand enligt U-värdesmetoden till $0,225 \text{ W/m}^2\text{K}$. Blomberg varierade för en parameter åt gången, centrumavståndet mellan reglarna, värmeledningsförmågan för stål samt godstjockleken på stålet och konstaterade sambandet i Formel (2.14). Enligt Blomberg (1996) uppgår det maximala felet mellan Formel (2.14) och den simulerade modellen till 2 %. Formel (2.14) gäller endast för den vägguppbyggnad som Blomberg valde att undersöka, ett tillägg av ett skikt gör att formelns felmarginal växer.

$$U = \frac{0,0042 + 0,43 \cdot \lambda_{\text{stål}} \cdot t}{c/c} + 0,225 \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (2.14)$$

Med förutsättning att

$$c/c > 100 \text{ mm} \quad \lambda_{\text{stål}} \geq 10 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad t = \text{godstjocklek} \geq 0,1 \text{ mm}$$

En studie av Gorgolewski (2007) syftar till att fram en förenklad metod för U-värdesberäkningar av stålregelkonstruktioner. Denna studie behandlar dock solida stålreglar, det vill säga reglar utan slitsar, där det används ett simuleringsprogram likt HEAT för att ta fram värmeflöden för 52 olika ytterväggskonstruktioner med stålreglar. Utgångspunkten för

beräkningarna är den förenklade metoden i ISO 6946 (SIS 2017a), medelvärde av lambdavärdesmetoden och U-värdesmetoden, se Formel

(2.15), där koefficienten p är 0,5.

$$R_T = p \cdot R_{max} + (1 - p)R_{min} \quad (2.15)$$

Ett antal försök att anpassa denna formel, genom att ändra p -värdet, utförs då den inte är applicerbar i sin ursprungsform. Resultatet av denna anpassning resulterar i Formel (2.16), där R_{min} är motståndet vid beräkning med lambdavärdesmetoden och R_{max} är motståndet vid beräkning med U-värdesmetoden.

$$p = 0,8 \frac{R_{min}}{R_{max}} + 0,44 - 0,1 \frac{w}{40mm} - 0,2 \cdot \frac{600 mm}{s} - 0,04 \frac{d}{100 mm} \quad (2.16)$$

Där

w = regelns flänsbredd 20 – 60 [mm]

s = centrumavstånd i primärskikt 300 – 800 [mm]

d = regeldimension 50-200 [mm]

Anpassningen ger en medelavvikelse från de simulerade värdena på $\pm 2,7$ % och en maximal avvikelse på 8%.

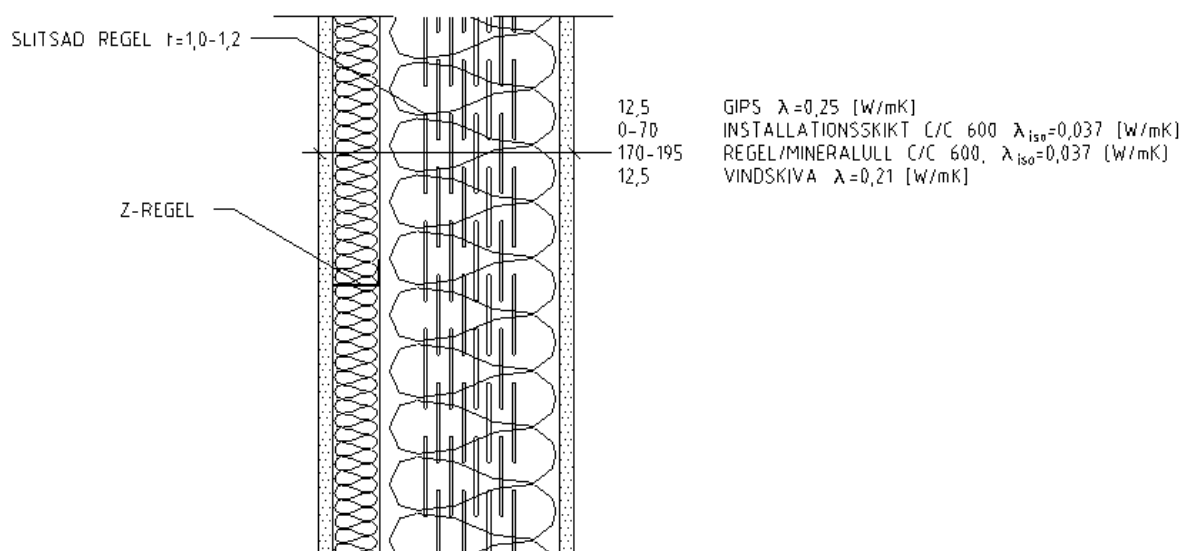
De Angelis och Serra (2013) utförde en studie som vidareutvecklar den metod, framtagen av Gorgolewski (2007), som visar att medelavvikelsen kan bli så liten som 0,04 %. Den slutgiltiga metod som bidrog till minst avvikelse från de simulerade värdena resulterade i fyra olika formler för väggens motstånd, som beror av väggens uppbyggnad. De oberoende parametrarna är motståndet för väggen utan stålreglar, c/c för primärskikt, regeldimension för primärskikt samt regeldimension för installationsskikt. Även denna metod hanterar homogena stålreglar utan slitsar.

2.7 Leverantörer

Informationen som leverantörer av slitsade stålreglar, exempelvis Gyproc, Europrofil och Lindab väljer att redovisa är väldigt varierad. Lindab och Europrofil tillverkar endast helslitsade stålreglar med skurna slitsar medan Gyproc endast tillverkar reglar med stansade slitsar. Lindab har valt att inte redovisa några U-värden på sin hemsida utan delar enbart med sig av dessa till sina kunder medan Gyproc och Europrofil redovisar ett antal olika utföranden i tabellform.

Gyproc redovisar U-värden för det enklaste snittet av väggen och som då också är mest gynnsamt ur energihänsyn. Detta väggsnitt ger U-värdet utan beaktande av kortlingar,

hammarband eller syll (Gyproc 2010b). De har endast utfört beräkningar för centrumavstånd på 600 mm vilket även bidrar till ett lägre U-värde än ett centrumavstånd på 450 mm som är vanligt förekommande. Gyproc redovisar U-värden för olika väggkonstruktioner, uppbyggda med deras väggsystem. I Tabell 2.2 redovisas U-värdet för ett antal flerskiktsväggar uppbyggda enligt Figur 2.5, då med ett primärskikt med slitsade stålreglar, ett installationsskikt med liggande Z-reglar samt en yttre vindskiva och en inre gipsskiva. Där värmekonduktiviteten för isoleringen och vindskivan hämtats från Gyproc (2010a) och värmekonduktiviteten för gipsen hämtats från Gyproc (2015). De har i sina beräkningar varierat godstjocklek, primärskiktets tjocklek samt installationsskiktets tjocklek. De har dock inte tagit hänsyn till eventuell fasadskiva och redovisar heller inte vad de olika reglarna har för värmekondutivitet eller antalet slitsar, samt deras dimensioner (Gyproc 2010b).



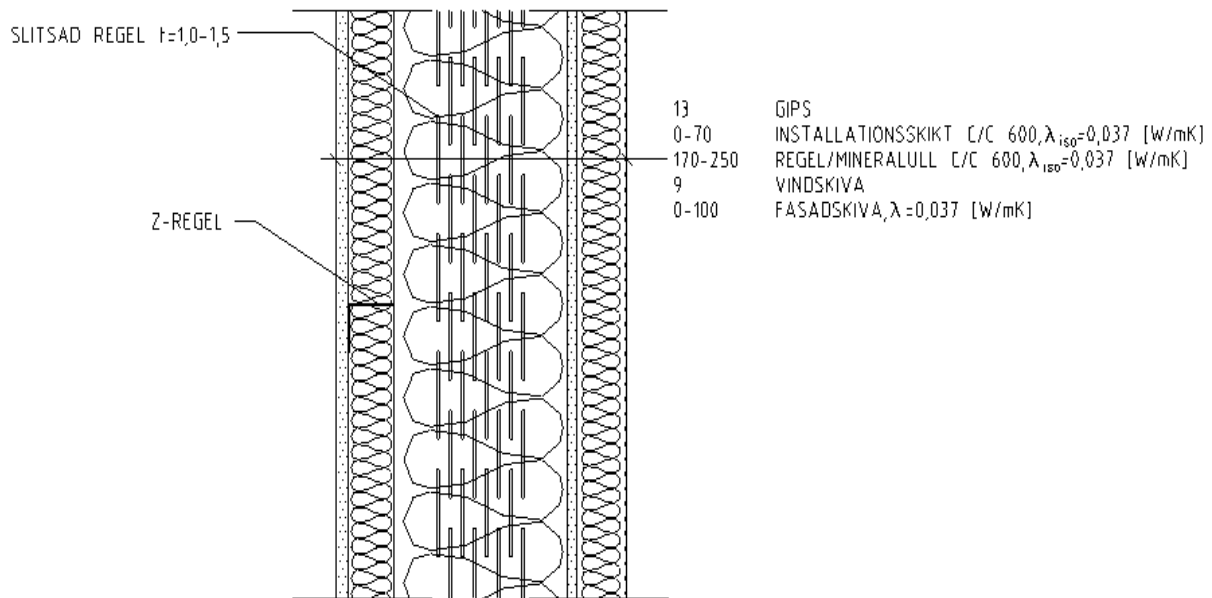
Figur 2.5 Skiss över uppbyggnad av flerskiktsväggen enligt Gyproc

Tabell 2.2 Exempel på U-värden för Gyprocs konstruktioner (Gyproc 2010b)

Vägguppbyggnad			
Regeldim [mm]	Godstjocklek [mm]	Installation. [mm]	U – värde [W/m ² ·K]
170	1,0	0	0,24
170	1,2	0	0,25
170	1,0	45	0,20
170	1,2	45	0,21
170	1,0	70	0,19
170	1,2	70	0,20
195	1,0	45	0,19
195	1,2	45	0,19
195	1,0	70	0,18
195	1,2	70	0,18

Europrofil redovisar U-värden för vägguppbyggnader enligt Figur 2.6 med ett primär- och installationsskikt med centrumavstånd 600 mm. De har även väggkonstruktioner med en

fasadskiva, denna med en ingående Z-regeln (Europrofil 2017a). En inre gipsskiva på 13 mm tillkommer samt en vindskyddsskiva mellan primärskiktet och fasadskivan på 9 mm men de anger ingen värmekonduktivitet för dessa material. Värmekonduktiviteten för all isolering anges dock till $0,037 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Europrofil uppger inte om de tar hänsyn till syll, hammarband eller kortlingar (Europrofil 2017a). I Tabell 2.3 redovisas U-värden för ett urval av Europrofilers väggkonstruktioner.



Figur 2.6 Skiss över uppbyggnad för flerskiktsväggen enligt Europrofil

Tabell 2.3 Exempel på U-värden för Europrofilers konstruktioner (Europrofil 2017a)

Vägguppbyggnad				
Regeldimension [mm]	Godstjocklek [mm]	Installation [mm]	Fasad [mm]	U – värde [W/m²·K]
170	1,0	45	50	0,16
170	1,0	0	0	0,25
195	1,0	45	0	0,18
195	1,0	45	80	0,13
220	1,5	45	100	0,12
220	1,5	0	0	0,17
250	1,5	70	100	0,11
250	1,0	70	50	0,12

Lindab redovisar som nämnt inte U-värden för några av sina stålregelkonstruktioner. Gemensamt för de olika leverantörerna är att de inte presenterar hur beräkningarna har genomförts, vilka beräkningsprogram som de använt eller vilka förenklingar som de valt att göra. Utöver detta har en noggrannhet på endast två värdesiffror redovisats av Gyproc och Europrofil.

3. Förstudie

Förstudien syftar till att undersöka hur dagens arbetssätt för energiberäkningar gällande slitsade stålreglar ser ut. För att utreda detta intervjuas representanter för två av Sveriges ledande byggföretag. Resultatet av de två intervjuerna utgör grunden för det fortsatta arbetet.

3.1 Intervjumetodik

3.1.1 Standardisering & strukturering

Vid upplägg av intervjuerna är det främst två aspekter som bör tas i fråga, intervjuens grad av standardisering och struktur. Det första är hur mycket ansvar som lämnas till intervjuaren gällande utformning av intervjun, även kallat *standardisering*. *Struktur* handlar däremot om hur stor frihet respondenten har i utformningen av sina svar under intervjun (Patel & Davidson 2011). En enkät med flervalfrågor är ett exempel på en typ av intervju med både hög grad av standardisering och struktur. Respondenten har lite, till inget, utrymme att utveckla sina svar, detta passar sig i sammanhang där jämförelse och generalisering är av stor vikt för studien. Om studien istället är helt ostandardiserad har intervjun inget underlag, utan frågorna formuleras under intervjun och ställs i den ordning som faller bäst utifrån respondenten (Merriam 1994).

Metodiken för förstudien hade en förhållandevis fri struktur och en viss grad av standardisering. Ett underlag för intervjuerna förbereddes innan för att intervjuerna skulle stå på samma grund, dessa återfinns i Bilaga 9.1. Varje intervju tilläts dock att utvecklas i sin egen riktning utifrån situation. Vid en del av frågorna uppmanades respondenten utveckla svaren ytterligare under intervjun. Enligt Patel & Davidson (2011) kan intervjumetodiken använd under förstudien gå under namnet semistrukturerad.

3.1.2 Registrering & sammanställning

För att allt som framkom under intervjuerna skulle finnas tillgängligt valdes intervjuerna att genomföras under ljudinspelning, detta godkändes av respondenten vid varje intervjutillfälle. Vid förfrågan om respondenten fanns tillgänglig för en intervju fick respondenten en kort beskrivning och vad detta arbete innefattade och efter ett godkännande beslutades tid och plats för intervjun. Därefter skickades de förberedda frågorna ut till respondenten för att ge en chans för förberedelse. Under den inledande delen av intervjun beskrevs studien och dess syfte återigen.

Efter intervjuerna användes en kvalitativ bearbetning genom att svaren transkriberades för att senare kunna analyseras. Bearbetningen av materialet skedde direkt efter intervjutillfället för att underlätta bearbetningen då resultatet är lättare att återkoppla till när det är färskt (Patel & Davidson 2011). Transkriberingen bearbetades och analyserades sedan för att sammanställa ett resultat.

3.2 Resultat

Resultaten av förstudien redovisas intervjuvis för att läsaren lättare ska kunna få en översiktlig bild av vad respektive intervju gav för resultat. Kapitlet delas upp i presentation av respondenten, följt av intervjusvar och därefter sammanfattas förstudien.

3.2.1 Fallföretag 1

Presentation av respondenten

Respondenten för fallföretag 1 har yrkestitel Byggnadsfysiker, vilket innebär att hen utför fukt- och energianalyser av byggnadskonstruktioner. Vidare arbetar hen även med energieffektiva byggnadslösningar, bland annat passivhus.

Energiberäkningar – tillvägagångssätt för slitsade stålreglar

Respondenten hade ingen information om hur många av projekten som använder utfackningsväggar med stålreglar, men en kvalificerad gissning är att det är relativt stor andel. Hen menar på att alla större projekt med utfackningsväggar använder slitsade stålreglar medan träreglar endast används vid mindre projekt. Fallföretag 1 har inget standardiserat arbetssätt när det gäller projekt med slitsade stålreglar, utan det är upp till varje ingenjör att ta reda på U-värden, vilket då ofta leder till att U-värdet för en byggnadsdel hämtas från leverantören. Leverantören redovisar dock inte U-värden för alla väggkonstruktioner vilket gör att det många gånger istället utförs en kvalificerad gissning av väggens värmeledning utifrån mer eller mindre liknande konstruktioner. En annan lösning är att beräkna U-värden utifrån ISO standard 6946 (SIS 2017a), vilket är den standard som diskuteras i Avsnitt 2.1.4. Denna standard är som tidigare nämnts inte tillåten att använda vid konstruktioner med genomgående metall, vilket leder till att stålregeln i vissa fall modelleras om till en träregel.

Energiberäkningar – Problematiken

Problematiken, enligt respondenten, är främst att det inte finns något standardiserat sätt beräkna U-värden för slitsade stålregelkonstruktioner, vilket leder till variation i hur ingenjörer löser problemet och därmed spridning i resultaten. Att hämta U-värden från leverantörer är problematiskt då de väggtyper leverantörerna redovisar värden för i många fall inte stämmer

överens med det ingenjören behöver. Respondenten är också kritisk till att ISO 6946 (SIS 2017a) inte gäller, utan den svenska standarden hänvisar till 3D modelleringar, vilket är tidskrävande. Utöver detta är det även ett problem att det inte finns mätningar som kan verifiera att 3D beräkningarna överensstämmer med verkligheten.

3.2.2 Fallföretag 2

Presentation av respondenten

Respondenten för fallföretag 2 har yrkestitel energi- och fuktspecialist, vilket innebär att hen utför fukt- och energianalyser på byggnadskonstruktioner i form av exempelvis en energiberäkning, energiuppföljning. Hen förklarar det som att rollen innebär att ”pyssla med allt relaterat till byggnadsfysik” och har mer än 10 års erfarenhet inom ämnet.

Energiberäkningar – tillvägagångsätt för slitsade stålreglar

Enligt respondenten är majoriteten av företagets projekt med utfackningsväggar utformade med slitsade stålreglar. Fallföretag 2:s arbetssätt vid energiberäkning av slitsade stålreglar är att göra om regeln till trä, då detta ger möjlighet till en 2-dimensionell beräkning eller till och med en handberäkning. Anledningen till detta antagande motiverar respondenten kommer ifrån en rekommendation från Thomas Blomberg, grundaren av beräkningsprogrammet HEAT som tidigare nämnt i Avsnitt 2.4. Denna rekommendation har sin grund i en studie genomförd av Blomberg som då resulterade i att slitsade stålreglar har ett beteende jämförbart med en 45 mm tjock träregel. Denna förenkling menar respondenten endast är möjlig vid en energiberäkning och ej vid en fuktberäkning.

Energiberäkningar - Problematiken

Vid frågan om respondenten finner några problem vid energiberäkningar är svaret att de inte har haft några problem, att göra om stålregeln till en träregel förenklar beräkningarna väsentligt och är även en metod de anser fungerar väl. Den verkliga energianvändningen har inte på något vis visat sig skilja från beräkningarna. Respondenten menar dock på att detta självklart kan utredas vidare, informationen de tagit del av från Thomas Blomberg är i dagsläget relativt gammal, men respondenten har inte tagit del av några senare studier som skulle visa på motsatsen och använder därav den information de har blivit tilldelade och anser att detta fungerar väl.

3.3 Slutsatser från förstudien

Ur förstudien framkommer det att fallföretag 2, till skillnad från fallföretag 1, har ett standardiserat sätt att arbeta med slitsade stålreglar, de gör om stålregeln till en träregel. I vissa

fall gör även fallföretag 1 detta, men det är inte etablerat sätt att hantera problemet inom företaget. Av detta skäl har en studie kring hur träreglar förhåller sig till stålreglar rent energimässigt valts att analyseras vidare. Fallföretag 1 anser att det är problematiskt att ISO 6946 (SIS 2017a) inte gäller och hade gärna haft tillgång till en metod som inte kräver 3D modellering, detta förs också vidare i arbetet.

4. Metodik för huvudstudien

Detta kapitel ger en inblick i de metoder som användes vid genomförandet av parameterstudien och uppbyggnaden av HEAT3-modellen. Kapitlet ger även en inblick i metodiken för den förenklade beräkningsmetoden av U-värdet. En beskrivning av metoden för jämförelsen mot en träregelkonstruktion innefattas även i kapitlet.

4.1 Parameterstudie

För att utreda vilka faktorer som påverkar värmeflödet genom en yttervägg med slitsade stålreglar utfördes en parameterstudie där de faktorer som antogs påverka U-värdet i högst grad studerades. För att utreda hur varje enskild parameter påverkade värmeflödet i väggen varierades parametrarna en åt gången. Ett basfall som ansågs tillhöra ett av de vanligare utförandena på stålregelväggar utformades. Utifrån detta basfall varierades sedan de olika parametrarna för att utreda dess inverkan på U-värdet. De parametrar som studerades var godstjocklek, regeldimension, installationsskiktets tjocklek, fasadskivans tjocklek samt de olika slitstyperna, dessa beskrivs mer ingående nedan.

För att avgöra hur stor inverkan varje parameter har på värmeflödet, oberoende av de andra parametrarna, studerades de var för sig. Detta bidrog dock inte med information om hur parametrarna påverkar och förhåller sig till varandra. Denna förenkling av problemet var dock nödvändig för att det skulle vara möjligt att avgöra vilka parametrar som var relevanta att föra vidare i studien.

4.1.1 Godstjocklek

Tjockleken på stålreglarna varierades mellan de tjocklekar som finns tillgängliga på marknaden hos de olika leverantörerna av stålprofiler. Då stålet har en hög värmeledningsförmåga i förhållande till övriga material förväntas en förändring i godstjocklek påverka värmeflödet. De tillgängliga tjocklekarna på marknaden som testas var 1,0 mm, 1,2 mm, 1,5 mm och 2,0 mm.

4.1.2 Regeldimension

Precis som för andra väggtyper antogs tjockleken på väggen, det vill säga regelns dimension påverka U-värdet. Därför testades de vanligaste regeldimensionerna 170 mm, 195 mm, 220 mm och 250 mm på primärskiktet. Dimensioner mindre än 170 mm valdes bort då de antogs ge ett så pass högt U-värde att de numera är sällsynta vid nybyggnationer.

4.1.3 Installationsskikt

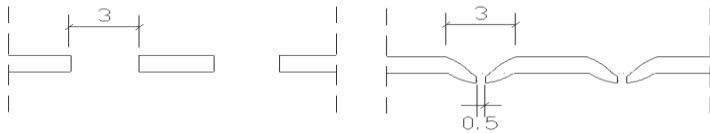
Förekomsten av installationsskikt är numera vanligt förekommande av flera anledningar. Ur fukthänsyn möjliggör skiktet att plastfolien kan placeras längre in i väggen vilket minskar risken för att den punkteras vid genomföringar. Installationsskiktet bryter även köldbryggor genom att minska andelen genomgående metall och kan utföras antingen med horisontella eller vertikala regler. Dimensionen på installationsskiktet antogs ha en betydande påverkan på värmeflödet genom väggen. De fall som valdes att studera var därför fallet utan installationsskikt samt dimensionerna 15 mm, 30 mm, 45 mm, 60 mm, 70 mm och 95 mm. Vissa av dessa storlekar är inte tillgängliga på marknaden men studerades för att lättare kunna finna ett samband.

4.1.4 Fasadskiva

Fasadskivan monteras utanpå stommen, innanför fasaden, och används även den av flera anledningar. I träregelstommar bidrar den till att öka fuktsäkerheten för träreglarna vars yttre delar annars hade varit placerade i en väldigt utsatt miljö. I fallet med stålregelstomme ökar inte fasadskivan fuktsäkerheten för reglarna men den får en mer betydande roll i att minska det totala värmeflödet genom väggen och även i att bryta köldbryggorna då stålreglar har en högre värmeledningsförmåga än träreglar. Fallen som studerades var det utan en fasadskiva samt tjocklekarna 15 mm, 30 mm, 50 mm, 65 mm, 80 mm, 100 mm och 115 mm. Vissa av dessa tjocklekar finns inte tillgängliga på marknaden men studerades, även de, av samma skäl som för installationsskiktet.

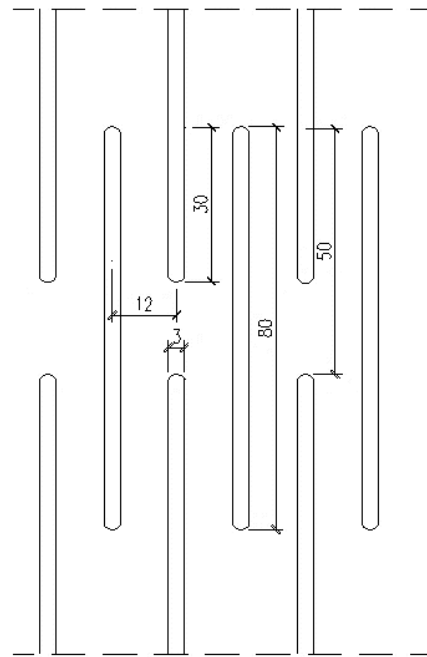
4.1.5 Slitstyp

De två metoderna för att tillverka slitsar i stålreglar resulterar i utseenden som påverkar värmeflödet genom regelkonstruktionen olika, detta har tidigare nämnt i Avsnitt 2.5.1. De stansade slitsarna har en betydligt bredare luftficka och dessutom mindre andel stål i jämförelse med de skurna, vilket antas leda till ett större värmeflöde i reglarna med skurna slitsar. Av detta skäl utgick parameterstudien från två väggtyper, en med stansade slitsar och en med skurna slitsar. Figur 4.1 illustrerar de olika utseendena som tillverkningsprocessen resulterar i.



Figur 4.1 Stansad slits (vänster) skuren slits (höger) [mm]

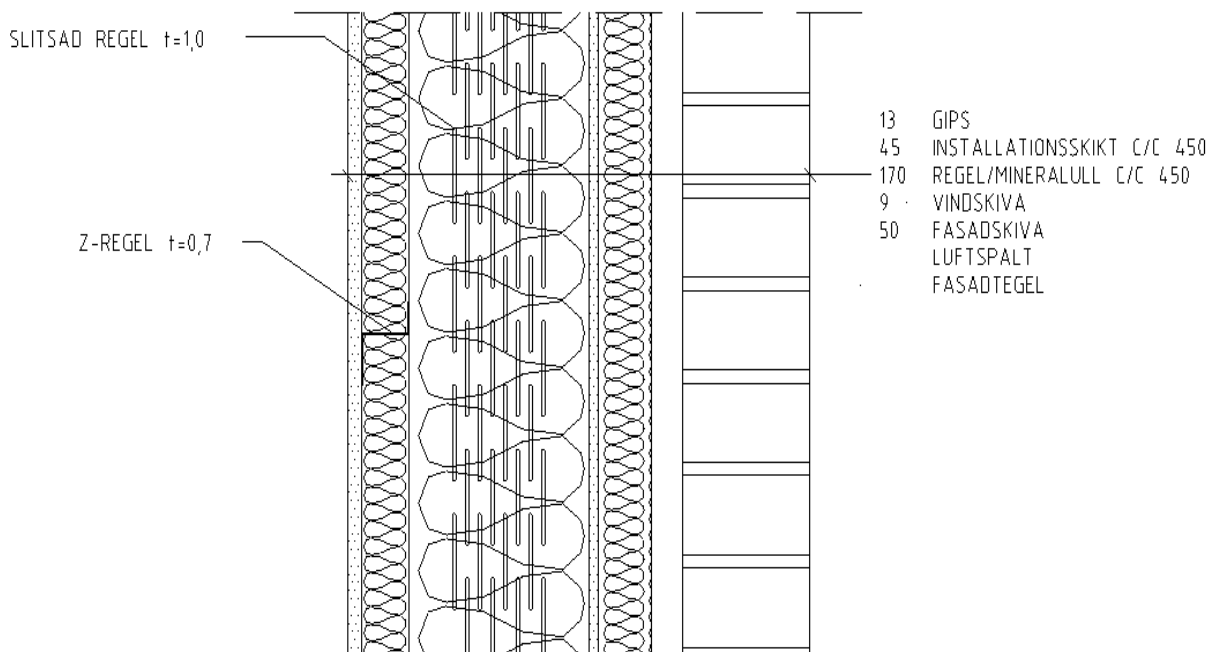
De dimensioner som valdes för slitsarna utformades efter ett platsbesök på ett husbyggnadsprojekt. Projektet använde sig av stålreglar med skurna slitsar. På plats mättes dimensionerna för slitsarna för att ge en bild av hur modellen senare skulle byggas upp, se Figur 4.1 och Figur 4.2.



Figur 4.2 Slitsdimensioner [mm]

4.1.6 Studiens basfall

Basfallen är parameterstudiens utgångspunkt, det togs fram två typer av basfall, ett för den stansade regeln och ett för den skurna. Uppbyggnaden av skikten är densamma för de två fallen, det enda som skiljer dem åt är slitstypen. Basfallet togs fram med stöd från energiingenjörer samt information från leverantörerna Lindab, Europrofil samt Gyproc. Avsikten var att basfallet skulle vara en vägg som är vanligt förekommande i branschen, med hänsyn till de olika ingående skikten men även dess tjocklek samt materialparametrar. Utifrån detta togs basfallet fram som visas i Figur 4.3.



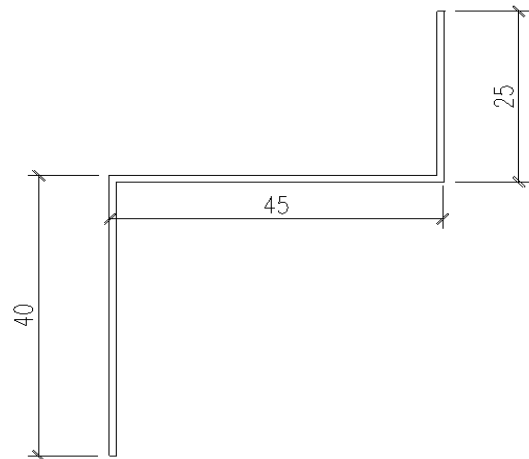
Figur 4.3 Studiens basfall

Lämpliga val av värmeledningsförmågan för de olika materialen har diskuterats med energiingenjörer, värdena för dessa presenteras i Tabell 4.1. Värmeledningsförmågan för luftfickorna som uppstår i slitsarna på stålreglarna har bedömts till 0,04 W/m·K, då de anses fungera på samma sätt som en ”dålig” isolering. Detta då platsbesök på husbyggnadsprojektet visade på att slitsarna inte endast är fyllda med luft utan även till viss del med isolering. Det motiveras även av att det kommer ske ledning, strålning samt konvektion mellan stålaterialet, luften och isoleringen vid slitsen.

Tabell 4.1 Värmeledningsförmåga för material i basfallsvägg

Material	Värmeledningsförmåga [W/m·K]
Fasadskiva	0,033
Vindskiva	0,30
Mineralull	0,036
Stålregel (förzinkat)	55
Luftfickor	0,04
Gips	0,25

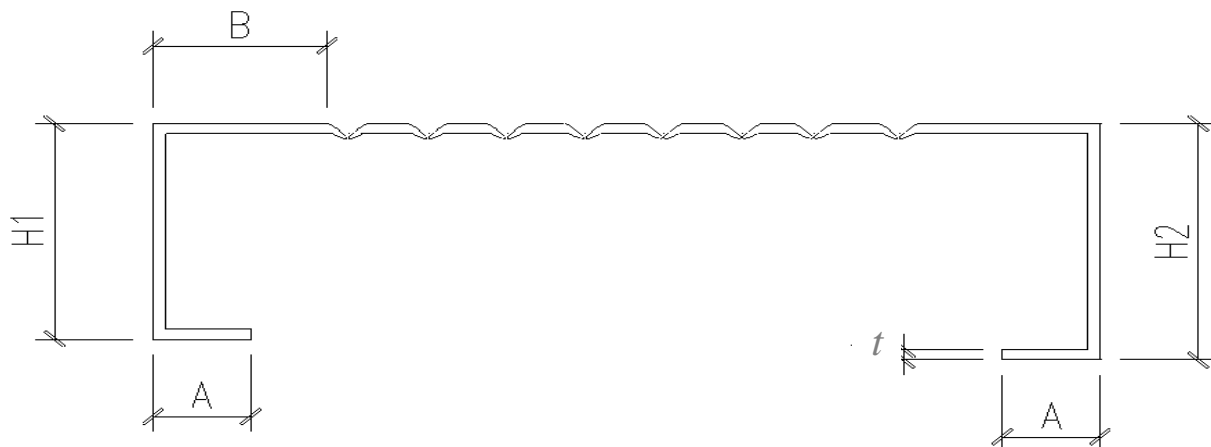
Installationsskiktet för basfallen byggs upp av en horisontal Z – regel, med dimensioner enligt Figur 4.4. Infästning av installationsskiktet med vertikala regler finns också tillgängliga på marknaden, men då sker det generellt med regler som är C-formade, alltså samma form som de slitsade stålreglarna. Horisontella regler i installationsskiktet valdes framför vertikala då de efter diskussion med energiingenjörer bedömdes vanligare. De bidrar även med en större köldbrygga då de stående reglarna i primärskiktet ligger i direkt anslutning till Z - regeln, vilket medför ett större värmefflöde i just denna punkt. Detta kan undvikas vid ett installationsskikt med vertikala regler då reglarna i primärskiktet och installationsskiktet kan placeras omlott. Ett centrumavstånd på 450 mm valdes för både primärstommen och installationsskiktet, detta med hänsyn till arbetsmiljön då skivorna som ska fästas på reglarna inte får vara för breda.



Figur 4.4 Dimensioner Z-profil [mm]

4.2 HEAT3-modell

Modellerna för simuleringarna strävade att efterlikna de verkliga stålprofilerna i så stor utsträckning som möjligt. Stålståren med skurna slitsar utformades efter Europrofilers stålprofiler, med de mått och utformning som de redovisar. Modellen av stålprofilen med skurna slitsar redovisas i Figur 4.5, där B anger det djup i regeln som slitsarna är placerade vid. Detta mått redovisas inte av någon leverantör, slitsarna placerades därför mitt på reglarna. $H1/H2$ hämtades från Europrofilers produktkatalog (Europrofil 2017b), för de tjocklekar på godset som ej är tillgängliga hos leverantören antogs $H1/H2$ förändras på samma sätt som för de tjocklekar som finns hos leverantören, detta redovisas i Tabell 4.2. Måttet för A sattes till 15 mm, enligt Wallgren (2016).

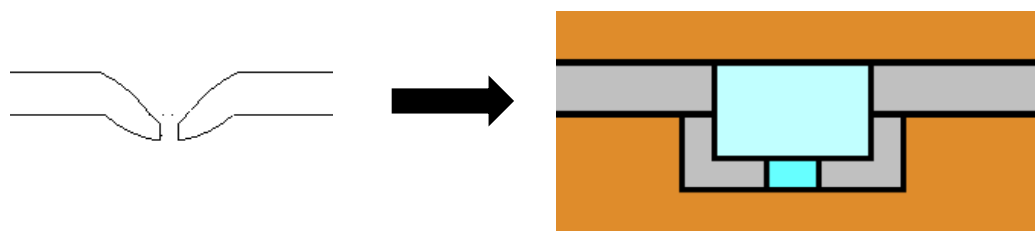


Figur 4.5 Utformning av stålprofilerna

Tabell 4.2 Förhållandet mellan tjockleken på godset och längden på regelflänsarna

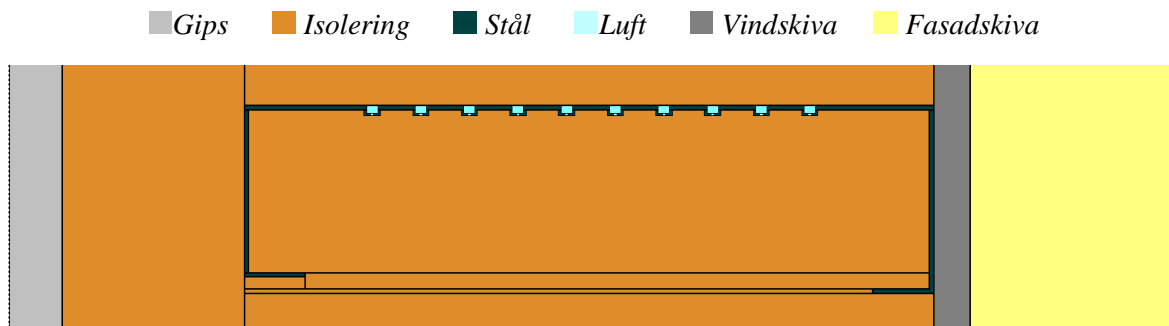
t [mm]	$H1/H2$ [mm]
1,0	42/46
1,2	44/48
1,5	46/51
2,0	49/54

Utseendet på de skurna slitsarna i HEAT3-modellen redovisas i Figur 4.6. Då HEAT3 är begränsat till att endast modellera rektanglar utformades slitsarna som avlånga rektanglar istället för den halvcylindriska form som de egentligen har. Volymen av stål i slitsarna förändrades dock inte och tjockleken på godset gjordes något tunnare för att efterlikna den utsträckning av stålet som sker när stålet viks ut.

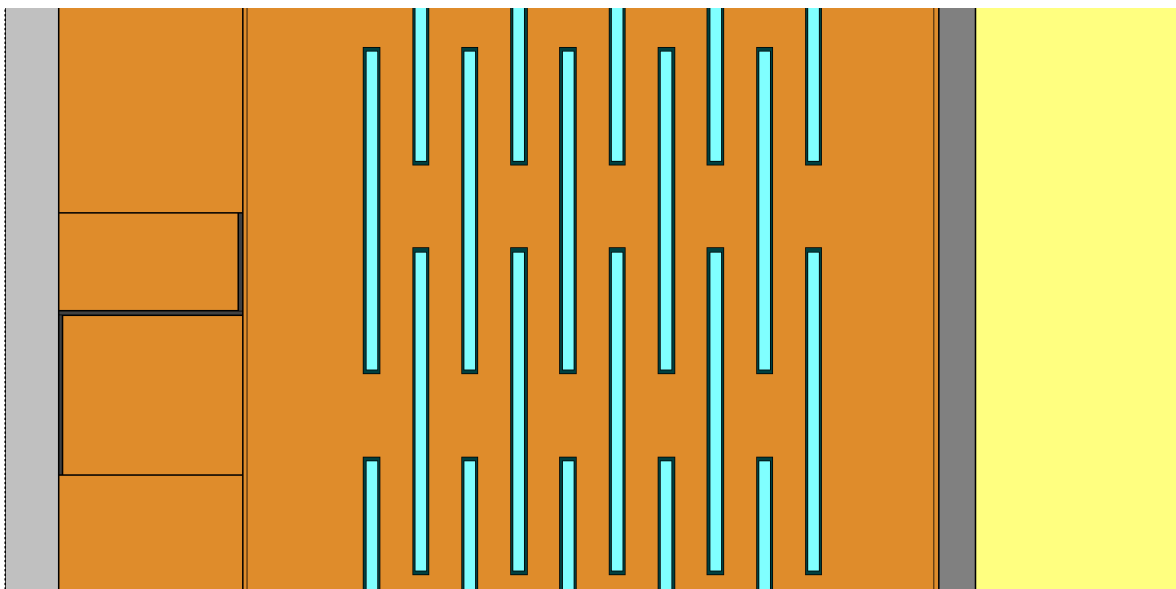


Figur 4.6 Skuren slits sett ovanifrån i HEAT3

I Figur 4.7 och Figur 4.8 visas HEAT3-modellen av den skurna slitstypens basfall. Installationsskiktet byggdes upp av en Z-profil. Denna har en tjocklek på 0,7 mm men då HEAT3 inte möjliggör modeller mindre än 1 mm utformades Z-profilen med en tjocklek på 1 mm där lambdavärdet för stålet justerades linjärt för att kompensera för detta. På samma vis modellerades slitsarna som 1 mm istället för 0,5 mm, enligt Tabell 4.1 och lambdavärdet på luften i slitsen justerades linjärt efter detta. Vid platsbesök på byggprojektet konstaterades det även att det inte bildades någon markant luftficka kring den invikta delen av regelflänsarna. Av den anledningen utformades modellen med isolering kring hela regelflänsen. Modellen byggdes även endast upp fram till fasadskivan, utanpåliggande fasadskikt plockas bort, motivering återfinns i Avsnitt 2.2.

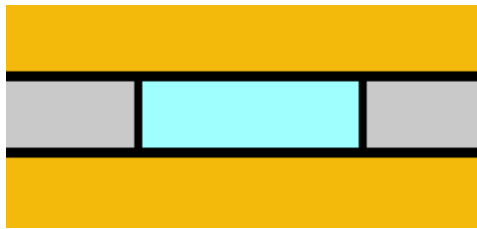


Figur 4.7 HEAT3-modell av stålregelvägg med skuren slits sett uppifrån



Figur 4.8 HEAT3-modell av stålregelvägg med skuren slits sett från sidan

Stålprofilerna med stansade slitsar utformades på samma sätt, med samma mått, som de skurna. Skillnaden mellan de två profilerna är endast utseendet på slitsen. Figur 4.9 visar hur modellen för den stansade slitsen byggdes upp, med en slitsbredd på 3 mm.



Figur 4.9 Stansad slits sett ovanifrån

C/c-avståndet bestämdes till 450 mm för både primärskiktet och installationsskiktet, modellen utformas därför enligt detta mått med både primärregeln och installationsregeln i centrum av modellen. Övergångsmotståndet invändigt antogs till $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ och utvändigt till $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Temperaturskillnaden över väggen ansattes till 1 grad med $1 \text{ }^\circ\text{C}$ i luften på väggens insida och $0 \text{ }^\circ\text{C}$ i luften på väggens utsida.

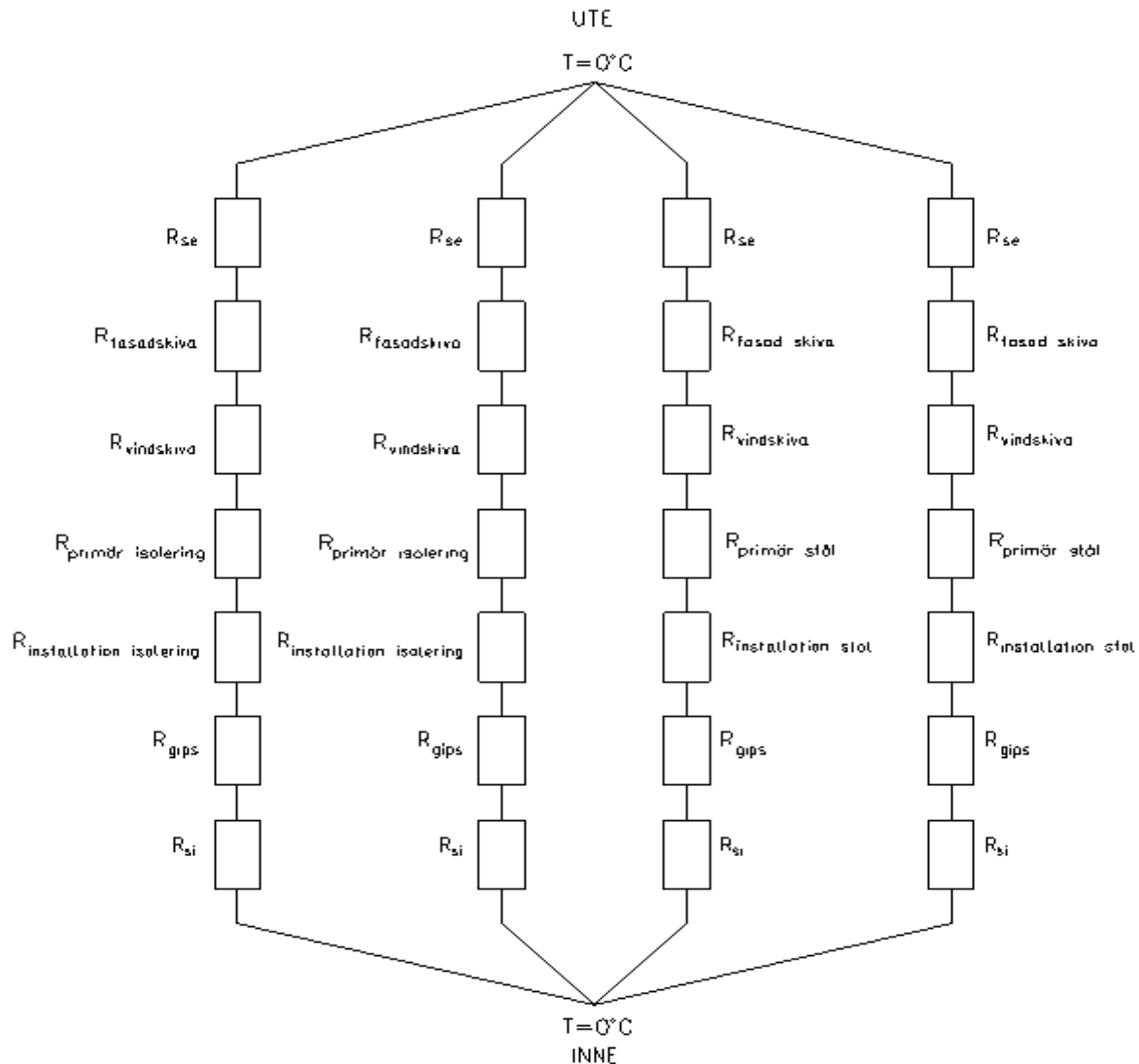
4.3 U-värdesformel

Att ta fram en förenklad metod för att behandla värmeflödet genom en slitsad stålregelkonstruktion har tidigare analyserats av Wallgren (2016). Metoden som då användes var att ta fram en ekvivalent värmeledningsförmåga eller lambdavärde (λ_{ekv}) för stålreglarna. Denna metod gör det möjligt att förenkla stålregeln, som har ett tredimensionellt flöde, till ett material med ett 2-dimensionellt flöde. Den negativa aspekten med denna metod är att det ekvivalenta lambdavärdet endast är applicerbart på den väggtyp det är framtaget för. Appliceras det på flerskiktsväggar uppbyggda på andra sätt ger det en avvikelse på U-värdet vars storlek är svår att bedöma utan en 3D-simulering.

I ett försök att minska felet och ta fram en förenklad metod användes de tredimensionella simuleringarna som genomfördes i HEAT3 tillsammans med U-värdesmetoden, som tidigare nämnts i Avsnitt 2.1.4. I Avsnitt 2.2 nämns även att U-värdesmetoden inte gäller för konstruktioner med genomgående stål, därav anpassades U-värdesmetoden för att kunna ta hänsyn till den inverkan de slitsade stålreglarna har på värmeflödet. Detta gjordes genom regressionsanalys, där målet var att ta fram koefficienter som gjorde att skillnaden mellan de tredimensionella simuleringarna och den anpassade U-värdesmetoden, U-värdesformeln, blev så liten som möjligt.

U-värdesmetoden utgår, som tidigare nämnt, från att värmeflödet har ett antal olika flödesvägar genom väggen, som sedan summeras för att bilda U-värdet. För en slitsad stålregelvägg med ett installationsskikt, bestående av horisontella Z-reglar, finns det fyra vägar värmen kan flöda. En schematisk skiss över detta visas i Figur 4.10. För de homogena skikten i väggen finns det endast en väg som värmen kan flöda. När skikten inte är homogena, såsom installationsskikt

och primärskikt, kan värmen istället flöda två olika vägar vilket leder till totalt 2^2 olika flödesvägar för värmen för den valda typen av väggupbyggnad.



Figur 4.10 Flödesschema

Formel (4.1) nedan anpassades med hjälp av regressionsanalys. Det ger då en anpassad U-värdesmetod i ett försök att göra beräkningsmetoden mer applicerbar på stålregelkonstruktioner. Formel (4.2) tar fram värmeflödet för flödesvägen helt utan stål och kan därför beräknas utifrån U-värdesmetoden, utan någon anpassning. Då stålet utgör en så liten areaandel förenklas isoleringen till att uppta 100 % av väggens area vilket leder till att Formel (4.1) får areaandelen 1. U-värdesmetoden anpassas däremot för Formel (4.3), (4.4) och (4.5), då dessa flödesvägar innehåller mer eller mindre mängd stål. Anpassningen sker med koefficienterna A_1 , A_2 , A_3 och A_4 . Koefficienterna A_1 , A_3 och A_4 viktas upp flödesvägarna med stål då dessa inte kan förväntas representeras enbart av hur stor andel stål de innehåller. A_2 representerar istället den slitsade stålregelns värmeledningsförmåga. Den delen av formeln som tar hänsyn till flödesvägens bidrag till det totala värmeflödet beskrivs av termen i täljaren i Formel (4.3), (4.4) och (4.5). Denna beror av godstjockleken på regeln i primär- och installationsskikt samt dessa två skikts centrumavstånd.

$$U_{tot} = U_{flödesväg1} + U_{flödesväg2} + U_{flödesväg3} + U_{flödesväg4} \quad (4.1)$$

Där

$$U_{flödesväg1} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.iso}}{\lambda_{inst.iso}} + \frac{d_{primär.iso}}{\lambda_{primär.iso}} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasad}}{\lambda_{fasad}} + R_{se}} \quad (4.2)$$

$$U_{flödesväg2} = \frac{A_1 \left(\frac{t_{inst} \cdot t_{primär}}{c/c_{inst} \cdot c/c_{primär}} \right)}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.stål}}{\lambda_{inst.stål}} + \frac{d_{primär.stål}}{A_2} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasad}}{\lambda_{fasad}} + R_{se}} \quad (4.3)$$

$$U_{flödesväg3} = \frac{A_3 \left(\frac{t_{inst}}{c/c_{inst}} \right)}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.stål}}{\lambda_{inst.stål}} + \frac{d_{primär.iso}}{\lambda_{primär.iso}} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasad}}{\lambda_{fasad}} + R_{se}} \quad (4.4)$$

$$U_{flödesväg4} = \frac{A_4 \left(\frac{t_{primär}}{c/c_{primär}} \right)}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.iso}}{\lambda_{inst.iso}} + \frac{d_{primär.stål}}{A_2} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasad}}{\lambda_{fasad}} + R_{se}} \quad (4.5)$$

Där

U_{tot} = totala U-värdet för väggen [$W/m^2 \cdot K$]

$U_{flödesväg n}$ = värmegenomgångskoefficient för flödesväg n [$W/m^2 \cdot K$]

d_n = tjocklek på skikt n [m]

t_n = godstjocklek på regel n [m]

λ_n = värmeledningsförmåga på material n [$W/m \cdot K$]

c/c_n = centrumavstånd för skikt n [m]

$R_{se} = 0,04$ [$m^2 \cdot K/W$]

$R_{si} = 0,13$ [$m^2 \cdot K/W$]

A_2 = Koefficient som tar hänsyn till stålregeln värmekonduktivitet [$W/m \cdot K$]

$A_{1,3,4}$ = Koefficient som tar hänsyn till flödesvägens inverkan på det totala värmeflödet [-]

I Formel (4.1) kan skiktens tjocklek, godstjockleken, värmeledningsförmågan på isoleringen i primärsikt, installationssikt och fasadskiva samt centrumavstånd på både primär- och installationsskiktet varieras och gör därför formeln applicerbar på ett stort antal typer av flerskiktsväggar. För att regressionsanalysen skulle ge en så korrekt uppskattning av koefficienterna som möjligt så eftersträvades en hög variation av vägguppbbyggnaden i de HEAT3-modeller som simulerades. Av samma anledning begränsades även valen av materialegenskaper och tjocklek till de fall som finns på marknaden idag. Formeln togs endast

fram för regler med skurna slitsar, detta huvudsakligen på grund omfattningen av denna del av arbetet. Fallet med skurna slitsar valdes även att analyseras då det är fler av leverantörerna som tillverkar skurna regler samt att detta fall bidrar till ett större värmefflöde genom väggen.

4.4 Jämförelse med trä

Jämförelse av 3D-simulering för stål och U-värdesberäkning för trä

Det framkom av förstudien att en metod för att beräkna värmefflödet i en vägg med slitsade stålreglar är att ersätta dessa med träreglar vid U-värdesberäkningar. För att bilda en uppfattning om hur slitsade stålreglar förhåller sig till träreglar ur energihänsyn utfördes därför en jämförelse mellan slitsade stålreglar och träreglar. U-värdet för en slitsad stålregelvägg, både skuren och stansad, jämfördes med motsvarande träregelvägg där U-värdet hade beräknats med hjälp av medelvärden av U-värdes- och lambdavärdesmetoden. För träregelväggen byttes stålregeln i primärskiktet samt installationsskiktet ut mot en träregel med tjocklek 45 mm. Primärskikt, installationsskikt och fasadskivans tjocklek samt materialegenskaper varierades på samma sätt som i parameterstudien.

Jämförelse av 3D-simulering för trä och U-värdesberäkning för trä

För att kunna bedöma hur väl U-värdesmetoden fungerar för trä genomfördes även ett antal HEAT3-simuleringar av träregelväggar. Detta för att få en uppfattning av storleken på felmarginalen i U-värdesberäkningar för träregelkonstruktioner. Det gav också en möjlighet att analysera hur U-värdet förändras när parametrarna varieras för jämförelse mot hur stålkonstruktionen beter sig.

5. Resultat & Analys

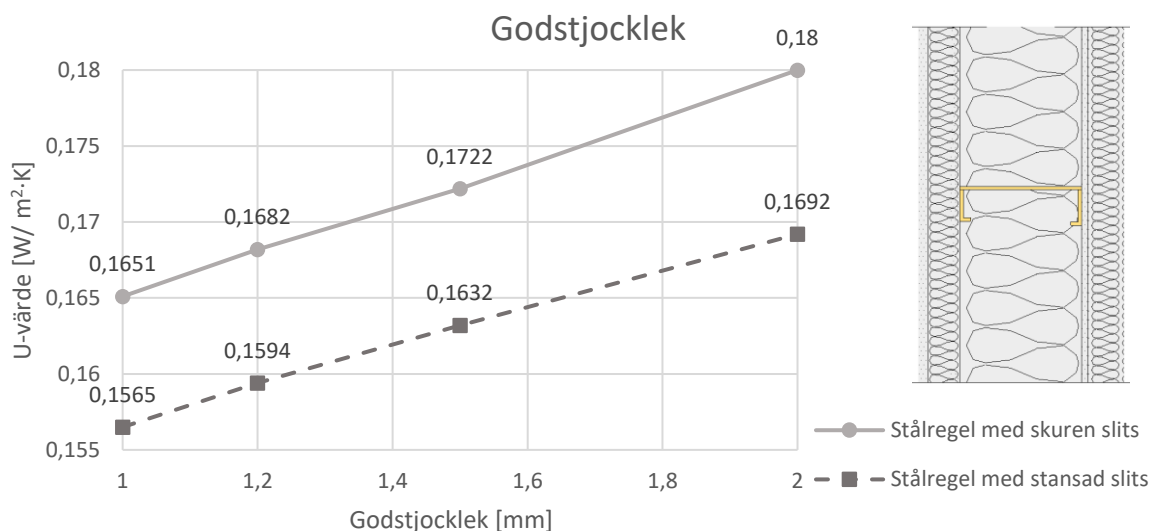
Detta kapitel redovisar resultat och analys av parameterstudien, framtagandet av en anpassningsbar formel för U-värdet samt jämförelse mot leverantörernas information och värmeflödet genom en träregelvägg.

5.1 Parameterstudie

Resultatet från parameterstudien sammanställdes i figurer där punkterna representerar resultatet från simuleringar i HEAT3. Dessa punkter ritades ut i ett diagram för att erhålla ett samband mellan parametern och värmeflödet genom väggen. De övre kurvorna visar resultaten för regeln med skurna slitsar och de undre resultaten för regeln med stansade slitsar. Basfallen som var parameterstudiens utgångspunkt hade en godstjocklek på 1,0 mm, en primär regeldimension på 170 mm, ett installationsskikt på 45 mm samt en fasadskiva på 50 mm. Utöver detta tillkom en invändig gipsskiva samt en vindskiva utanpå primärskiktet.

5.1.1 Godstjocklek

Resultatet för godstjocklekens simuleringar redovisas i Figur 5.1

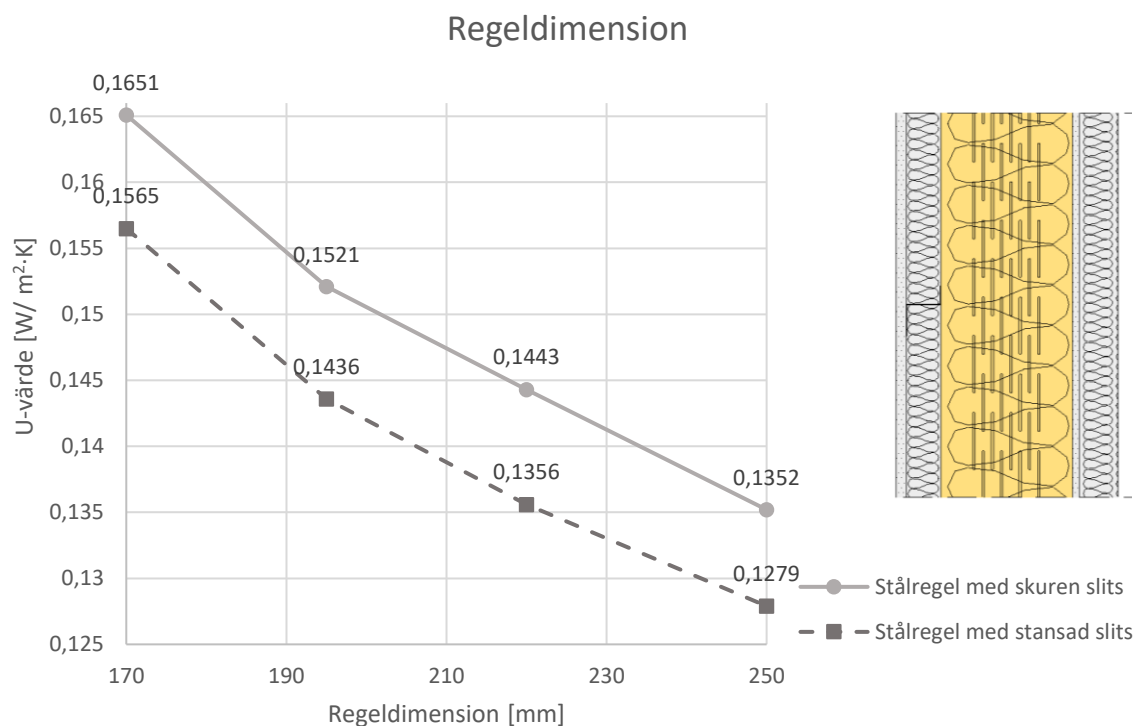


Figur 5.1 Resultat av variation av godstjockleken

Resultatet visar på ett högre värmefflöde för regeln med skuren slits, men båda kurvorna följer samma beteende, vilket i stort sett är linjärt. Figur 5.1 visar även att värmefflödet ökar med godstjockleken vilken förklaras av att en större godstjocklek medför en större andel stål i väggen. Stålet har, som nämnt i Avsnitt 2.1.1, en väsentligt mycket högre värmeledningsförmåga än isoleringen. Skillnaden i värmefflöde mellan slitstyperna är i medel 0,0093 W/ m²· K, vilket innebär att flödet för regeln med skuren slits i snitt är 5,7 % högre än för regeln med stansad slits. Dessutom ökar skillnaden mellan de olika slitstyperna med godstjockleken på regeln, den största skillnaden kan observeras vid en godstjocklek på 2 mm där regeln med skuren slits har ett 6,4 % högre värmefflöde. Detta beror på att förhållandet mellan slitsbredd och godstjocklek är så pass nära varandra att de inte kan analyseras som olika variabler. Utseendet på slitsen kommer därför ha betydelse för värmefflödet och de två olika slitstyperna kan av den anledningen inte antas ha samma beteende när godstjockleken varierar.

5.1.2 Regeldimensionen

Resultatet för variationen av regeldimensionen visas i Figur 5.2.

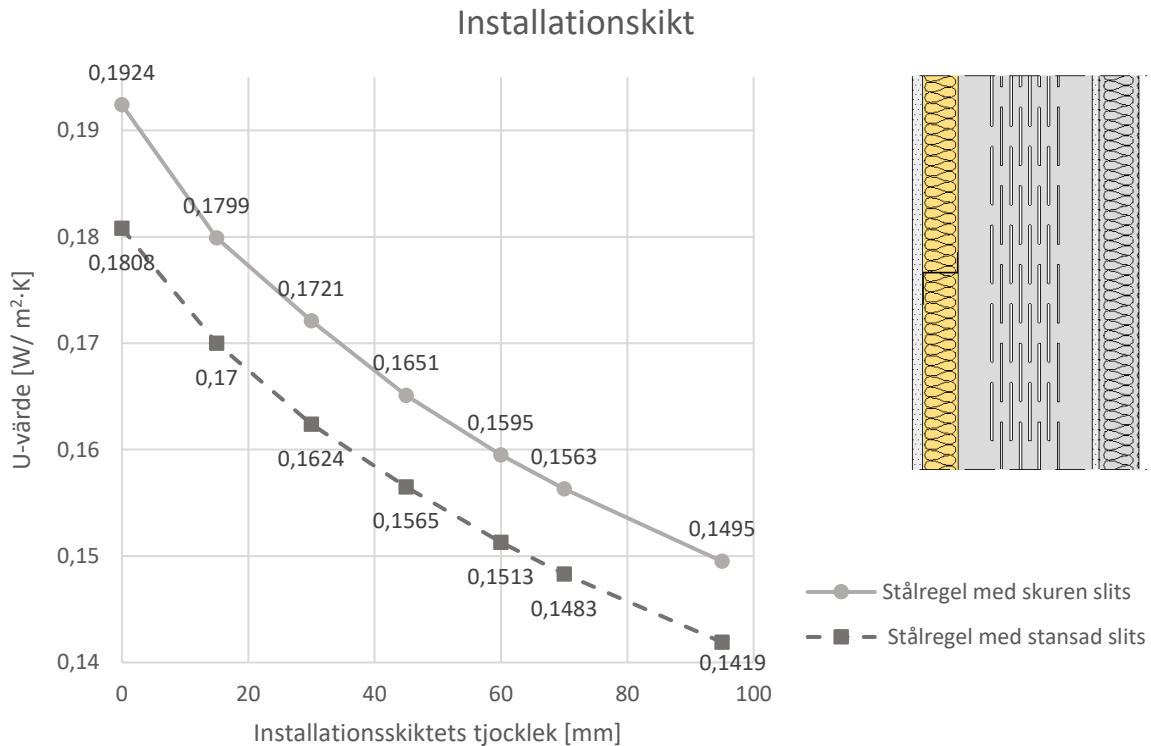


Figur 5.2 Resultat av variation av regeldimensionen

Vid variation av regeldimensionen följer kurvorna, enligt Figur 5.2, inte ett linjärt samband utan flödesminskningen avtar med en ökad regeldimension. Skillnaden i flöde mellan den skurna slitsen och den stansade är i snitt 6 %.

5.1.3 Installationskikt

Flödets variation med installationskiktets tjocklek redovisas i Figur 5.3

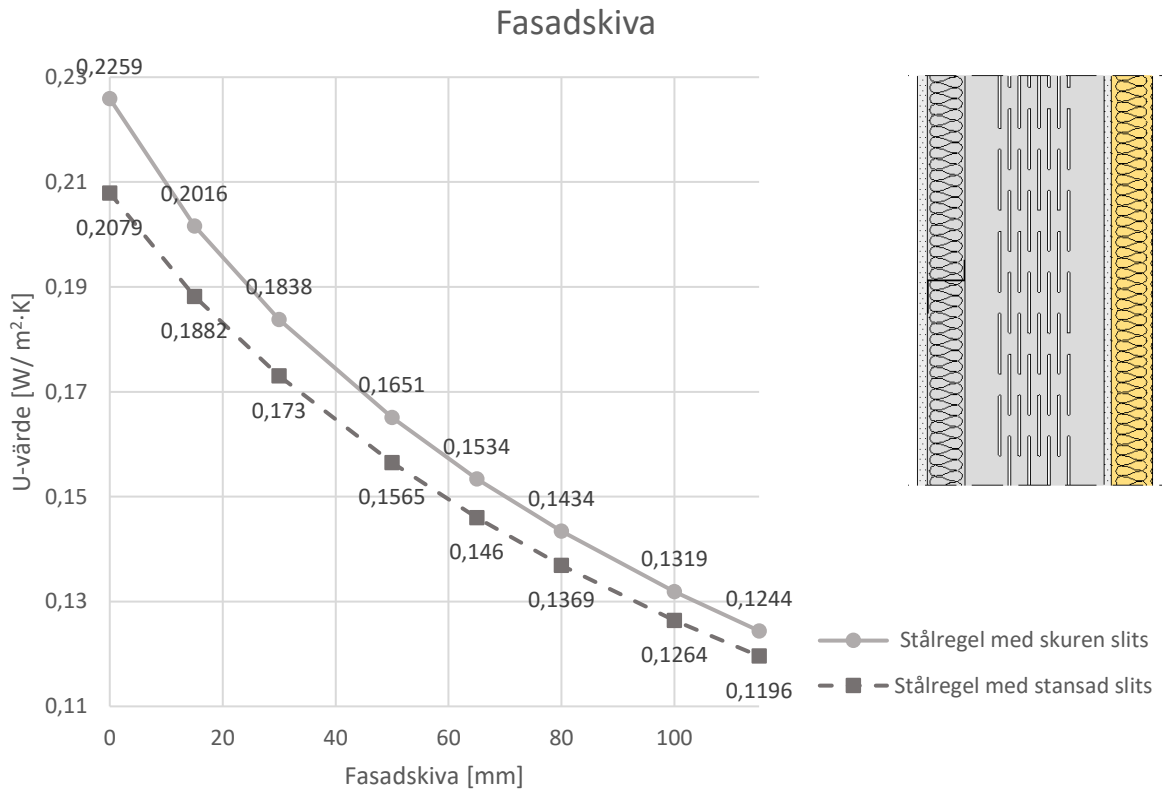


Figur 5.3 Resultat av variation av installationskiktet

Lutningen på de två kurvorna i figuren avtar succesivt vid en ökning av installationskiktets tjocklek. Störst förändring sker när väggen går från att inte ha ett installationskikt alls till ett installationskikt på 15 mm. Ett 15 mm tjockt installationskikt är dock inte ett möjligt utförande med standardreglar, utan den minsta tillgängliga tjockleken är 45 mm. Det innebär att ett tillägg av ett installationskikt på 45 mm på en vägg utan installationskikt minskar värmeflödet med 13 % för fallet med stansad slits och 14 % för fallet med skuren slits. Anledningen till att installationskiktet får störst effekt när det adderas till en vägg utan något installationskikt är på grund av att väggens andel av genomgående stål sänks markant, vilket har en väldigt stor inverkan på värmeflödet. Skillnaden i flöde mellan de två slitstyperna är i medel 5,5 % högre flöde för den skurna slitsen än för den stansade.

5.1.4 Fasadskiva

Resultatet för fasadskivans inverkan på U-värdet visas i Figur 5.4.



Figur 5.4 Resultat av variation av fasadskiva

Resultatet för fasadskivans inverkan på värmeflödet påminner om resultatet för installationsskiktet. Effekten är även i detta fall störst när en fasadskiva adderas till en vägg som tidigare inte haft någon fasadskiva, detta av samma anledning som nämndes i parameterstudien för installationsskiktet. Vid tillägg av en fasadskiva på 15 mm på en vägg som tidigare inte haft någon fasadskiva minskar flödet med 11 % för fallet med skuren slits och 9 % för fallet med stansad slits. Lutningen på kurvan i Figur 5.4 är dock något brantare för fasadskivan än för installationsskiktet, vilket visar på att fasadskivan har större påverkan på U-värdet. Skillnaden mellan slitstyperna minskar då fasadskivan ökar och är som störst vid en fasadskiva på 0 mm, där en skillnad mellan slitstyperna på 9 % kan observeras. Den minsta skillnaden ges när fasadskivan är 115 mm, för en vägg med skurna regler blir värmeflödet då 0,5 % högre än för samma vägg med stansade regler.

5.2 U-värdesformel

Arbetet med att ta fram en förenklad beräkningsmetod för U-värdet gällande slitsade stålregelkonstruktioner resulterade i en formel baserad på U-värdesmetoden. Denna anpassades med hjälp av koefficienter framtagna genom regressionsanalys, koefficienterna samt analysen kring dess värden presenteras nedan.

5.2.1 Regressionsanalysens koefficienter

Regressionsanalysen utfördes till en början linjärt men då denna gav en stor avvikelse mellan HEAT3-simuleringarna och formeln övergick regressionen istället till den olinjära typen. Den olinjära regressionsanalysen visade dock att enbart en formel för de olika primärregeldimensionerna inte var tillräckligt för att få ett godtagbart fel. Av detta skäl togs tre olika formler fram, en formel för regeldimensionerna 170 mm och 195 mm, en formel för regeldimension 220 mm samt en formel för regeldimension 250 mm. Orsaken till att det inte var möjligt att ta fram en formel för alla regeldimensionerna förmodas bero på att antalet slitsar inte ökar med regeldimensioner över 195 mm. Regeldimensionerna 220 mm och 250 mm har samma antal slitsar som regeldimension 195 mm, vilket bidrar till en betydligt större andel stål i regeldimensionerna 220 mm och 250 mm i förhållande till 170 mm och 195 mm. Resultatet av den olinjära regressionsanalysen för respektive av de olika regeldimensionerna redovisas i Tabell 5.1, Tabell 5.2 samt

Tabell 5.3, där korrelationskoefficienten, R^2 , visar hur väl anpassade formlerna är mot datamängden.

Tabell 5.1 Koefficienternas värde från regressionsanalysen med regeldimension 170 mm och 195 mm

Koefficient	Värde
A_1	8883
A_2	0,57
A_3	94,1
A_4	0,45
R^2	0,989

Tabell 5.2 Koefficienternas värde från regressionsanalysen med regeldimension 220 mm

Koefficient	Värde
A_1	7509
A_2	0,32
A_3	98,7
A_4	8,4
R^2	0,997

Tabell 5.3 Koefficienternas värde från regressionsanalysen med regeldimension 250 mm

Koefficient	Värde
A_1	9497
A_2	0,39
A_3	104,8
A_4	7,4
R^2	0,980

Korrelationskoefficienten, R^2 , för samtliga fall visar på att U-värdesformlerna är väl anpassade till datamängden, där den lägsta ligger på 98 %.

5.2.2 U-värdesformelns resultat och begränsningar

Resultatet av regressionsanalysen ger de värden på koefficienterna som redovisas i ovanstående avsnitt. Dessa koefficienter gäller dock enbart inom de begränsningar av variablerna som beskrivs nedan.

$$U_{tot} = U_{flödesväg1} + U_{flödesväg2} + U_{flödesväg3} + U_{flödesväg4} \quad (5.1)$$

Där

$$U_{flödesväg1} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.iso}}{\lambda_{inst.iso}} + \frac{d_{primär.iso}}{\lambda_{primär.iso}} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasadskiva}}{\lambda_{fasadskiva}} + R_{se}} \quad (5.2)$$

$$U_{flödesväg2} = \frac{A_1 \left(\frac{t_{inst} \cdot t_{primär}}{c/c_{inst} \cdot c/c_{primär}} \right)}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.stål}}{\lambda_{inst.stål}} + \frac{d_{primär.stål}}{A_2} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasadskiva}}{\lambda_{fasadskiva}} + R_{se}} \quad (5.3)$$

$$U_{flödesväg3} = \frac{A_3 \left(\frac{t_{inst}}{c/c_{inst}} \right)}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.stål}}{\lambda_{inst.stål}} + \frac{d_{primär.iso}}{\lambda_{primär.iso}} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasadskiva}}{\lambda_{fasadskiva}} + R_{se}} \quad (5.4)$$

$$U_{flödesväg4} = \frac{A_4 \left(\frac{t_{primär}}{c/c_{primär}} \right)}{R_{si} + \frac{d_{gips}}{\lambda_{gips}} + \frac{d_{inst.iso}}{\lambda_{inst.iso}} + \frac{d_{primär.stål}}{A_2} + \frac{d_{vind}}{\lambda_{vind}} + \frac{d_{fasadskiva}}{\lambda_{fasadskiva}} + R_{se}} \quad (5.5)$$

Med förutsättning,

$$30 \text{ mm} \leq d_{fasad} \leq 100 \text{ mm}$$

$$0,029 \text{ W/m} \cdot \text{K} \leq \lambda_{fasadskiva} \leq 0,033 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$0 \text{ mm} \leq d_{inst.n} \leq 95 \text{ mm}$$

$$170 \text{ mm} \leq d_{\text{primär.n}} \leq 250 \text{ mm}$$

$$0,032 \text{ W/m} \cdot \text{K} \leq \lambda_{\text{isolering}} \leq 0,037 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$t_{\text{inst}} = 0,7 \text{ mm}$$

$$1,0 \text{ mm} \leq t_{\text{primär}} \leq 2,0 \text{ mm}$$

$$450 \text{ mm} \leq c/c_n \leq 600 \text{ mm}$$

En av de begränsningar som visade sig under regressionsanalysen var att en fasadskiva på 0 mm inte var ett möjligt utförande då formeln kraftigt underskattar värmeflödet. Av detta skäl behöver fasadskivan vara strikt större än 0 mm om U-värdesformeln ska vara applicerbar. Ytterligare en begränsning är att U-värdesformlerna endast är applicerbara på regeldimensionerna 170 mm, 195 mm, 220 mm och 250 mm. En viktig aspekt är att installationsregelns godstjocklek, t_{inst} , inte ansätts till noll för fallet utan installationsskikt. Detta då flödesvägens andel ej tas hänsyn till om godstjockleken, t_{inst} , är noll. Istället så kompenseras detta med att skikts tjocklek, $d_{\text{inst.n}}$ ansätts till noll.

Det maximala felet för alla formler i jämförelse mot simuleringarna i HEAT3 är maximalt $\pm 3,5$ %. Det ska dock tilläggas att det genomfördes 117 stycken simuleringar av 18432 stycken möjliga kombinationer, vilket innebär att 0,6 % av alla olika kombinationer av väggkonstruktioner har simulerats. De möjliga fallen inkluderar endast konstruktionslösningar som finns på marknaden i dagsläget inom de begränsningar som U-värdesformeln möjliggör.

5.3 Jämförelse mot leverantör

Jämförelse mellan HEAT3-simuleringarna för regeln med skurna slitsar och Europrofils angivna U-värden för motsvarande konstruktioner redovisas i Tabell 5.4. Vid jämförelsen har HEAT3-simuleringarnas resultat avrundats till två decimaler.

Tabell 5.4 Jämförelse mellan Europrofils angivna U-värden och HEAT3-simuleringarna

Vägguppbyggnad				Europrofil [W/m ² ·K]	HEAT3 – Skuren [W/m ² ·K]
Regeldim. [mm]	Godstjock. [mm]	Installation. [mm]	Fasadskiva [mm]		
170	1,0	45	50	0,16	0,16
170	1,0	0	0	0,25	0,26
195	1,0	45	0	0,18	0,19
195	1,0	45	80	0,13	0,13
220	1,5	45	100	0,12	0,12
220	1,5	70	0	0,17	0,17
250	1,5	70	100	0,11	0,11
250	1,0	70	50	0,12	0,12

För de valda väggkonstruktionerna stämmer Europrofils U-värden väl överens med de tredimensionella beräkningarna. Alla värden utom två överensstämmer med två decimalers noggrannhet, de två som avviker har båda en fasadskiva på 0 mm. Det finns ytterligare ett fall där fasadskivan är 0 mm, men för denna stämmer U-värdet överens vilket gör det svårt att bedöma om det är fasadskivan på 0 mm som bidrar till avvikelsen.

Jämförelsen mellan HEAT3-simuleringarna för reglarna med stansade slitsar och Gyprocs angivna U-värden för motsvarande konstruktioner redovisas i Tabell 5.5.

Tabell 5.5 Jämförelse mellan Gyprocs angivna U-värden och HEAT3-simuleringarna

Vägguppbyggnad				
Regeldim. [mm]	Godstjock. [mm]	Installation. [mm]	Gyproc [W/m ² · K]	HEAT3 – Stansad [W/m ² · K]
170	1,0	0	0,24	0,24
170	1,2	0	0,25	0,24
170	1,0	45	0,20	0,19
170	1,2	45	0,21	0,20
170	1,0	70	0,19	0,18
170	1,2	70	0,20	0,18
195	1,0	45	0,19	0,17
195	1,2	45	0,19	0,17
195	1,0	70	0,18	0,16
195	1,2	70	0,18	0,16

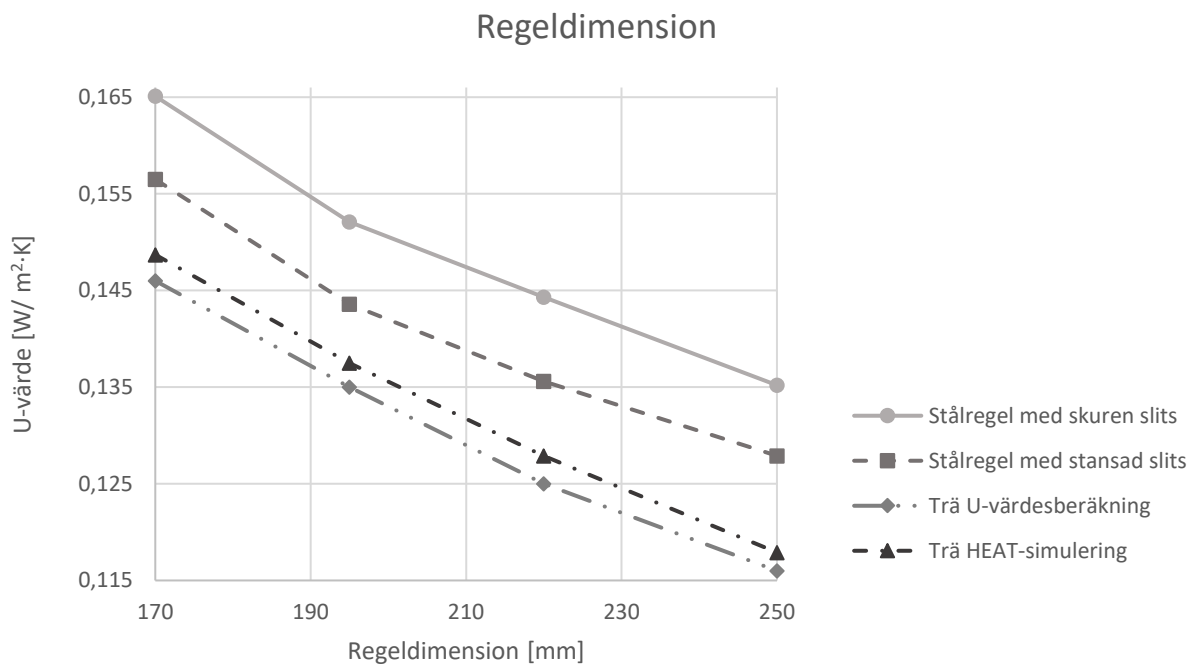
Generellt ligger Gyprocs angivna U-värden över de tredimensionella simuleringarna. Den största skillnaden är 11 % och den minsta 0 %, där skillnaden ökar då konstruktionen blir tjockare.

5.4 Jämförelse mot träreglar

Resultatet för jämförelsen mot en träregelkonstruktion presenteras i figurer där punkterna på kurvorna representerar värdet från handberäkningar samt HEAT3-simuleringarna som sedan sammankopplats till kurvor. Resultatet för parametrarna redovisas i Figur 5.5, Figur 5.6 och Figur 5.7.

5.4.1 Regeldimensionen

I Figur 5.5 presenteras hur en variation av regeldimensionen påverkar värmeflödet för en stålregelkonstruktion i förhållande till en träregelkonstruktion, samt hur väl motsvarande U-värdesberäkningar för trä överensstämmer med HEAT3-simuleringarna.

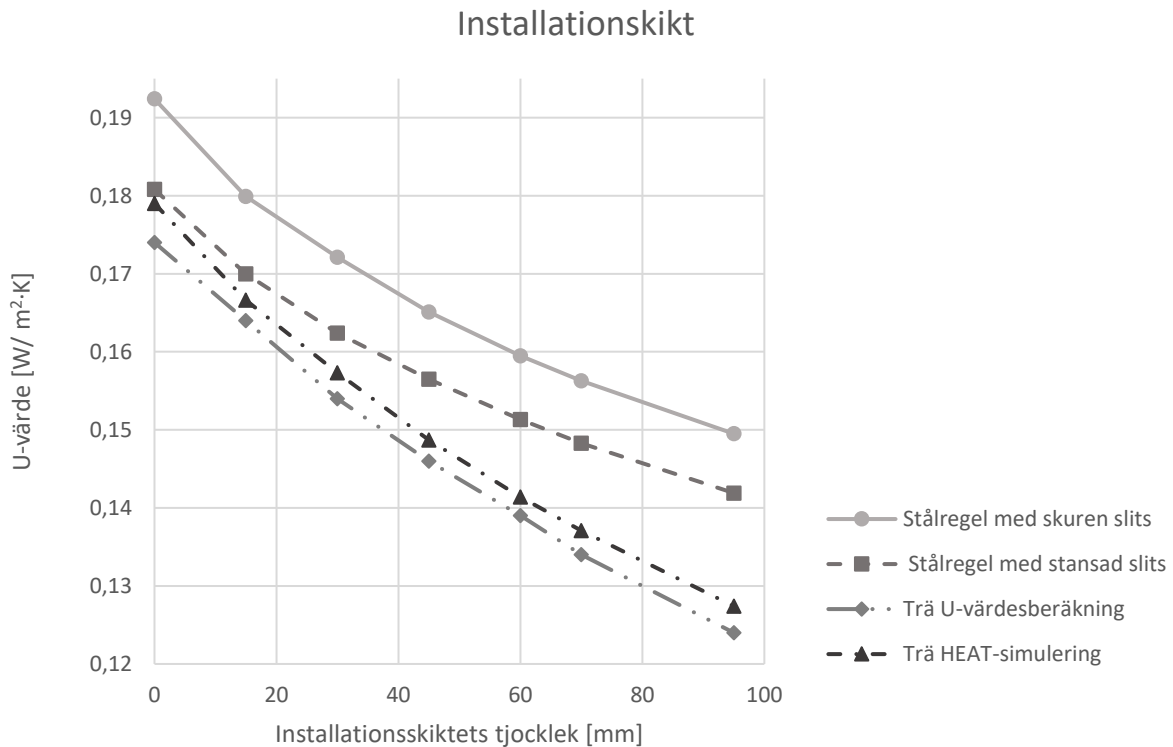


Figur 5.5 Jämförelse av regeldimensionens inverkan på U-värdet för träreglar och slitsade stålreglar

Skillnaden mellan U-värdesberäkningen för trä och HEAT3-simuleringen för stansade slitsar varierar mellan 6 % och 9 %. För reglarna med skurna slitsar är skillnaden till U-värdesberäkningen för trä något större, 11 % till 14 %. Att felet varierar så pass lite tyder på att trä och stål har ett liknande beteende för denna parameter. Det går dock att se att de simulerade värdena för trä följer kurvan för handberäkningarna bättre än stålreglarna. Skillnaden mellan de simulerade värdena och U-värdesberäkningarna varierar mellan 1,6 % och 2,3 %.

5.4.2 Installationskikt

I Figur 5.6 presenteras hur en variation av installationskiktets tjocklek påverkar värmeflödet för en stålregelkonstruktion i förhållande till en träregelkonstruktion, samt hur väl motsvarande U-värdesberäkningar för trä överensstämmer med HEAT3-simuleringarna.

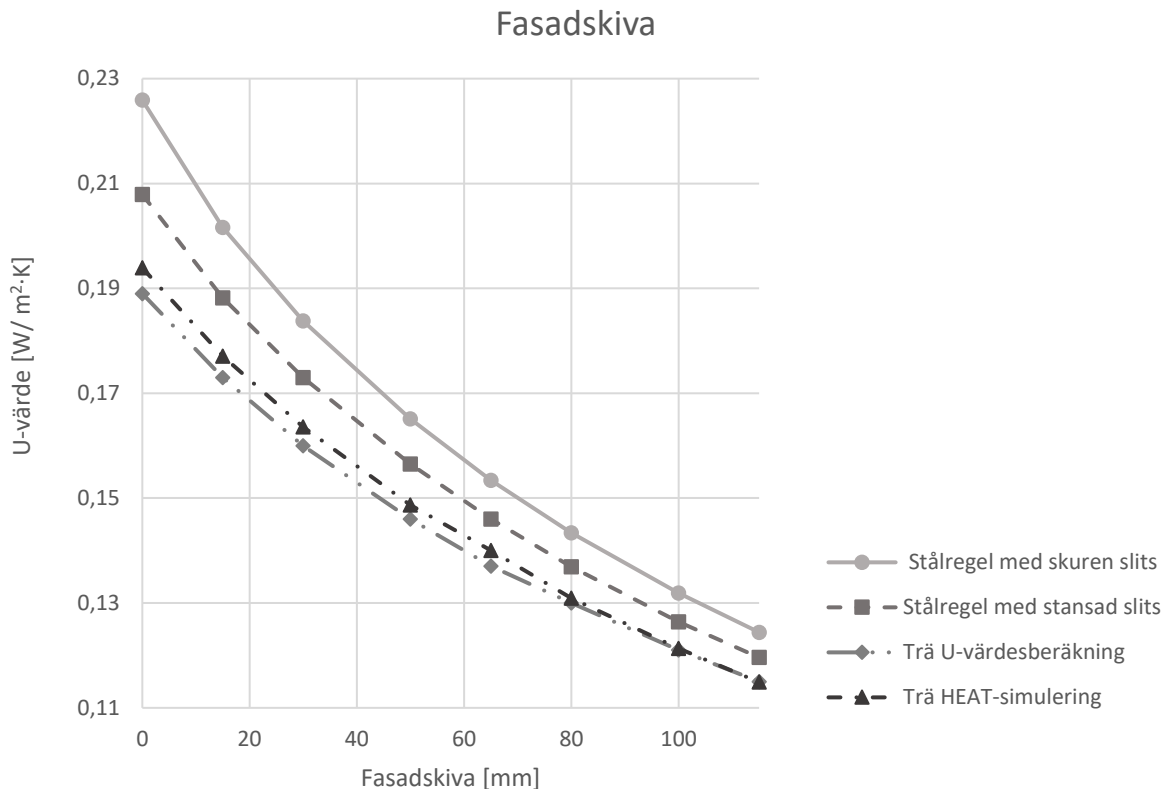


Figur 5.6 Installationskiktets påverkan på U-värdet för träreglar och slitsade stålreglar

Skillnaden är som störst mellan U-värdesberäkningen för träreglar och HEAT3-simuleringen för stålreglar med skurna slitsar, där skillnaden varierar mellan 9 % och 17 %. För stålreglarna med stansade slitsar är skillnaden något lägre, 4 % till 13 %. Det går även att se att installationskiktet får en större inverkan i fallet med träreglar när installationskiktet blir tjockare, det vill säga när installationskiktet ökar så ökar även skillnaden mellan trä och slitsat stål. Till skillnad från fallet med regeldimensionen så uppvisar trä och stål i detta fall väldigt olika beteende. Träet uppvisar ett nära på linjärt beteende i Figur 5.6 medan stålet har en betydligt mer olinjär kurva. De två kurvorna för trä följer däremot varandra väldigt väl, felet mellan U-värdesberäkningen och HEAT3-simuleringen varierar mellan 1,6 % och 2,9 %.

5.4.3 Fasadskiva

I Figur 5.7 presenteras hur en variation av fasadskivans tjocklek påverkar värmeflödet för en stålregelkonstruktion i förhållande till en träregelkonstruktion, samt hur väl motsvarande U-värdesberäkningar för trä överensstämmer med HEAT3-simuleringarna.



Figur 5.7 Fasadskivans påverkan på U-värdet för träreglar och slitsade stålreglar

HEAT3-simuleringarna för reglarna med skurna slitsar skiljer sig mot U-värdesberäkningarna för trä med 8 % till 16 %. För de stansade slitsarna är skillnaden något lägre, 4 % till 8 %. Precis som det kunde konstateras i parameterstudien så närmar sig kurvorna varandra när fasadskivans tjocklek ökar vilket följer det tidigare resonemanget om att de andra skiktens inverkan blir obetydliga när fasadskivan går mot en "oändlig" tjocklek. För denna parameter uppvisar träet och stålet ett liknande beteende, där stålet dock har en betydligt brantare kurva. Felet mellan simuleringsvärdena och de beräknade värdena för trä växer när fasadskivan närmar sig noll. Skillnaden mellan de två kurvorna för trä går då från 0 % till 2,5 %.

Gemensamt för alla kurvor är att träregelkonstruktionerna alltid ger ett lägre U-värde än de slitsade stålregelkonstruktionerna, där skillnaden är störst mellan trä och stålreglar med skurna slitsar. Skillnaden mellan stålreglar med skurna slitsar och träreglar är 8 – 17 % för de fall som utreds. För stålreglar med stansade slitsar är skillnaden något lägre, 4 – 13 %. Det går att konstatera att U-värdesberäkningarna för trä alltid underskattar värmeflödet genom väggen i förhållande till HEAT3-simulerade värden för träregelkonstruktionerna. Detta trots att U-värdesberäkningen är medelvärde av U-värdesmetoden och λ -värdesmetoden, som ska ge den bästa uppskattningen av värmeflödet vid en handberäkning.

6. Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultatens rimlighet, där några aspekter utvecklas ytterligare för att bidra med klargörande av vissa resultat. I kapitlet diskuteras även modellernas noggrannhet, kontroller som genomförts samt eventuella felkällor.

6.1 Parameterstudien

I parameterstudien var en av parametrarna som studerades, slitstypens inverkan på U-värdet. Andra studier har bortsett från slitsflänsarnas inverkan vid regeln med skurna slitsar då denna ansetts ha liten påverkan på värmeflödet. I parameterstudien visade sig dock skillnaden mellan de två slitstyperna vara i medel 5 – 6 %, men uppgick till så mycket som 9 %, där regeln med skurna slitsar för samtliga fall medförde ett högre värmeflöde.

De två parametrar som visade sig har störst inverkan på värmeflödet var installationsskikt och fasadskiva, där fasadskivans effekt var något högre. Detta antas bero på att fasadskivan helt bryter den genomgående metallen i väggen. För fasadskivan gick det även att se att kurvorna närmade sig varandra vid en ökande tjocklek vilket inte var lika tydligt för installationsskiktet. Att kurvorna närmar sig varandra kan härledas tillbaka till U-värdesmetoden, när ett skikt växer kommer dess inverkan på U-värdet att få en allt mer dominerande roll, detta speciellt om skiktet även har en låg värmeledningsförmåga.

En begränsning i parameterstudien var att enbart variera på en parameter åt gången, detta för att begränsa arbetets omfattning. Det gav dock inte en komplett bild av parametrarnas beteende då de inte kan antas påverka värmeflödet oberoende av varandra.

6.2 U-värdesformeln

U-värdesformeln som grundar sig på olinjär regression uppges i resultatet ha en felmarginal på $\pm 3,5$ %. För att få en uppfattning av formelns användbarhet är det intressant att se hur denna felmarginal ställer sig mot andra beräkningsmetoder. Blomberg (1996) genomförde en mindre omfattande studie, då med tre oberoende variabler samt en annan typ av analys vilket resulterade i ett fel mellan formeln och modellens värden som uppgick till maximalt 2 %. Wallgren (2016) tog fram ett ekvivalent lambdavärde för det slitsade stålet, som vid kontroll i en mer komplex konstruktion gav en avvikelse på 0,2 %. Hur väl detta lambdavärde är

applicerbart på en varierande konstruktion med varierande materialegenskaper går dock inte att dra några slutsatser kring då inga fler konstruktionslösningar utreddes. Gorgolewski (2007) studie och även de Angelis och Serra (2013) vidareutveckling av denna studie resulterade i en formel för U-värdesberäkningarna av stålregelväggar med ett relativt litet fel. Formeln hanterar dock endast homogena stålreglar och en jämförelse med denna och den framtagna U-värdesformeln för slitsade stålreglar är därför inte möjlig. Av störst intresse är dock att jämföra hur väl den standardiserade beräkningsmetoden för träreglar, enligt ISO 6946 (SIS 2017a) stämmer överens med tredimensionella simuleringar för träregelkonstruktioner. HEAT3-simuleringar för träregelkonstruktioner genomfördes och jämfördes mot U-värdesberäkningar, ett medelvärde av lambdavärdesmetoden och U-värdesmetoden. I denna jämförelse, som genomfördes för fallen i parameterstudien, uppgår felet till maximalt 2,9 %. En felmarginal på $\pm 3,5$ % för U-värdesformeln som hanterar ett betydligt mer komplext problem, den slitsade stålregelkonstruktionen, anses då inte orimligt. Formeln bygger på sju oberoende variabler vilket naturligtvis ger ett större fel än om färre valmöjligheter givits. Det anses dock nödvändigt för att formeln ska vara till nytta vid energiberäkningar.

U-värdesformeln har ett antal begränsningar, men spänner över de vanligaste väggkonstruktionerna. De simuleringar som formeln baserats på har valts omsorgsfullt för att täcka en så stor variation av de möjliga kombinationerna som möjligt. Ett större antal simuleringar hade bidragit till en högre säkerhet i formeln, men krävde en avvägning för vad som ansågs rimligt, utan att syftet med en formel istället för tabellvärden förlorades. Inom de begränsningar som angetts anses formeln ha en god säkerhet, med en korrelationskoefficient på över 98,9 % för samtliga formler. Det är dock omöjligt att dra några slutsatser kring hur väl en extrapolation, det vill säga att gå utanför de begränsningarna, skulle fungera då felet varierar utan direkt samband, vilket är en effekt av den olinjära regressionsanalysen.

Koefficient A_2 , som tar hänsyn till den slitsade stålregelns värmeledningsförmåga, blir enligt regressionsanalysen mindre än $0,6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Stål har en värmeledningsförmåga på $60 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ vilket gör att ett ekvivalent lambdavärde för en slitsad stålregel på $0,6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ är orimligt. Därav kan det ekvivalenta lambdavärdet, värdet på koefficient A_2 , endast appliceras på respektive formel och inte i några andra fall. Att resultatet för det ekvivalenta lambdavärdet blir orimligt lågt är dock inte helt oväntat då U-värdesmetoden som tidigare nämnt inte är applicerbar på genomgående metaller. Stålet höga värmeledningsförmåga anses även vara anledningen till att koefficient A_1 i U-värdesformeln antar det högsta värde bland de koefficienter som tar hänsyn till flödesvägens inverkan på U-värdet. Det går dock inte uteslutande säga att koefficienternas värde enbart beror av flödesvägens betydelse och lambdavärdet på stålet. Då U-värdesmetoden inte hanterar stålreglarnas komplexitet får koefficienterna från regressionsanalysen kompensera för detta helt utan hänsyn till rimlighet i värde, vilket innebär att de tappar sin ursprungliga innebörd.

6.3 Jämförelse mot leverantörer

Vid jämförelsen mot leverantörerna skilde sig Gyprocs tabellerade värde tydligast från de tredimensionella simuleringarna. Detta anses till viss del bero på att den slitsade stålregeln i HEAT3-modellen har utformats utifrån Europrofils dimensioner då Gyproc inte redovisar hur deras regler ser ut i detalj. Detta bidrar med en viss osäkerhet i jämförelsen mot Gyproc. Då Gyprocs samtliga värden ligger över de simulerade kan man dock misstänka att deras U-värden åtminstone inte är underskattade. Vidare bör det tilläggas att ingen av leverantörerna har med större detalj redovisat hur modeller för deras beräkningar byggts upp. Vilket gör det svårt att härleda orsaker till avvikelser. De redovisar inte heller några U-värden som inkluderar hammarband, syll och kortlingar vilket bidrar till att U-värdet för väggen inte är komplett.

Leverantörerna har valt att presentera två värdesiffror vilket är enligt den standard som finns i dagsläget (SIS 2017a), då det ifrån leverantörernas sida är deras slutgiltiga resultat. Det är möjligt att detta inte är tillräckligt för att kunna användas som indata. Vid användning av leverantörernas värden vid indata bör därför 3 värdesiffror användas, till exempel att ett tabellerat värde på $0,19 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ från leverantörerna övergår till $0,194 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ för ta hänsyn till eventuell avrundning. Detta innebär dock att en avvikelse på 0,009 kan förekomma om det är så att det verkliga värdet hade varit $0,185 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

6.4 Jämförelse mot träreglar

Från jämförelserna mellan HEAT3-simuleringarna för slitsade stålreglar och U-värdesberäkningarna för träregelkonstruktioner kan det konstateras att skillnaden mellan dessa varierar relativt kraftigt. U-värdesberäkningarna för träregelkonstruktioner underskattar värmeflödet mellan 8 % och 17 % för regler med skurna slitsar och mellan 4 % och 13 % för regler med stansade slitsar. Detta kan vid avrundning till två decimaler ge en underskattning av U-värde på upp mot $0,03 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Med dagens skärpta energikrav kan det ifrågasättas om förenklingen till en träregelkonstruktion är en tillräckligt god beräkningsmetod för slitsade stålregelkonstruktioner.

Det man även kan se i jämförelsen mellan HEAT3-simuleringarna för träregelväggarna och motsvarande för stålregelväggarna är att de inte uppvisar ett likartat beteende i alla situationer. Tydligast är detta vid variation av installationsskiktet där träreglarna följer en nära på linjär kurva medan stålreglarna varierar helt olinjärt. Även i de andra fallen går dock träregelväggarna mot betydligt mer linjära och flacka kurvor än vad stålet gör. Detta antas bero på att stål har ett väldigt högt lambdavärde medan träets lambdavärde ligger förhållandevis nära isoleringens.

Jämförelsen av HEAT3-simuleringarna för träregelkonstruktioner och U-värdesberäkningarna för motsvarande vägg visar att dessa kurvor följer varandra väldigt väl. Beräkningarna ger en underskattning av HEAT3-simuleringen i storleksordningen 0 % till 2,9 %. Det går dock att se att vid en minskande tjocklek på fasadskivan växer felet mellan U-värdesberäkningen och HEAT3-simuleringen för träet. Utifrån detta känns det rimligt att U-värdesformeln för den

slitsade stålregeln med sitt höga lambdavärde och brantare kurva för fasadskivan ger ett bristfälligt resultat i fallet utan någon fasadskiva.

Skoglund och Flemström (2012) anger i sitt resultat att skillnaden i värmetransport mellan den slitsade stålregel- och träregelkonstruktionen är liten, samt att denna skillnad minskade med en ökad mängd isolering. Detta beteende uppvisades även i denna studie, skillnaden i värmeflöde mellan träregelkonstruktionen och den slitsade stålregelkonstruktionen minskade med en ökande fasadskiva. Vilket kan förklaras av att ett ökat isolerskikt i väggen bidrar till att regelns inverkan på värmeflödet minskar.

6.5 Noggrannhetsanalys

För att öka samt kontrollera studiens trovärdighet genomfördes ett antal noggrannhetsanalyser för både HEAT3-modellerna och U-värdesformeln, dessa redovisas i Avsnitt 6.5.1 samt Avsnitt 6.5.2. I beräkningsprogrammet HEAT3 finns en del inbyggda funktioner för att kontrollera noggrannheten, utöver dessa genomfördes även en del egna test för att kontrollera modellens noggrannhet. Vid framtagandet av U-värdesformeln genomfördes ett flertal anpassningar av modellen för att komma fram till vilken modell som bäst beskriver värmeflödet genom den slitsade stålregelväggen.

6.5.1 HEAT3 modell

En inparameter som anges vid en HEAT beräkning är *mesh*, vilket förklaras som det rutnät modellen bygger upp vid en beräkning. Ett tätare rutnät ger ett noggrannare resultat, men beräkningen tar då längre tid i jämförelse med ett glesare rutnät. Enligt SIS (2017b) får skillnaden i värmeflöde för en modell maximalt uppgå till 1 % när antalet noder i rutnätet fördubblas. Ett test för detta genomfördes vid framtagningen av modellen för basfallet, resultatet visas i Tabell 6.1 och Tabell 6.2.

Tabell 6.1 Noggrannhetsanalys för regler med skurna slitsar

Mesh	Noder [-]	U-värde [W/m ² ·K]	Skillnad [%]
20	64042	0,1596	
40	161250	0,1617	1,3
60	333064	0,1631	0,9
80	591680	0,1639	0,5
100	968715	0,1645	0,4
110	1268136	0,1649	0,2
120	1513044	0,1651	0,1
150	3189732	0,1654	0,2

Tabell 6.2 Noggrannhetsanalys för regler med stansade slitsar

Mesh	Noder [-]	U-värde [W/m ² ·K]	Skillnad [%]
20	14000	0,1499	
60	97000	0,1524	1,7
80	216000	0,1535	0,7
100	470000	0,1549	0,9
110	588000	0,1551	0,1
120	785000	0,1555	0,3
150	1575000	0,1558	0,2

Tabellerna visar att skillnaden i värmeflöde stagnerar vid en ökning av mätpunkterna. Tabell 6.1 visar att *mesh* 40 för det skurna regelfallet har en tillräcklig noggrannhet då *mesh* på 60 ger en skillnad på 0,9 %. För de stansade regelfallet är kravet uppfyllt vid *mesh* 60 då skillnaden mellan en *mesh* på 60 och en *mesh* på 80 är 0,7 %. För att meshen skulle kunna uteslutas som en betydande felkälla valdes dock en *mesh* på 120 för alla efterkommande beräkningar.

För att öka noggrannheten ytterligare användes en funktion i HEAT3 kallat *Expansion point for numerical grid – given factor in item mesh*. Denna funktion medför att rutnätet vid beräkning blir tätare där denna funktion placeras och kan då ta hänsyn till detaljer som annars skulle kräva en ökad mesh. Då stålregeln är förhållandevis smal men står för en betydande del av värmeflödet, samt har ett komplext utseende, placerades denna funktion över stålregeln i x-, y-led. I x-, z-led placeras den över den mellersta slitsen i höjd med Z-regeln i installationsskiktet för att få med så mycket detaljer av slitsarna som möjligt. Rutnätets koncentration i varje riktning utifrån denna punkt valdes till 1,02 i x-led, 1,06 i y-led och 1,02 i z-led, detta gav en större koncentration över punkten som sedan avtog.

Ytterligare ett test som genomfördes var att en plastfolie inkluderades i HEAT3-modellen. Detta för att säkerställa att plastfolien inte agerade som en köldbryggebrytare i korspunkten mellan stålregeln i installationsskiktet och stålregeln i primärskiktet. Det kunde konstateras ett marginellt högre värmeflöde i fallet med plastfolie, vilket innebar att plastfolien inte agerade som en köldbryggebrytare och därför kunde bortses ifrån i beräkningsmodellen.

6.5.2 U-värdesformeln

Regressionsanalys kan kräva en stor mängd testkörningar för att hitta den lösning som bäst anpassar formeln till datapunkterna. Därav har ett flertal försök genomförts som senare visade sig vara sämre än den lösning som presenteras i Avsnitt 5.2.

För att säkerställa att U-värdesmetoden i sin ursprungliga form inte fungerade så testades fallet där de koefficienterna som tog hänsyn till flödesvägens inverkan bortsågs ifrån och endast den koefficient som motsvarar det ekvivalenta lambdavärdet ingick i formeln. Detta fall gav en underskattning av värmeflödet på upp mot 30 % och det ekvivalenta lambdavärdet uppskattades till $1,01 \cdot 10^{13} \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Utifrån detta kunde det konstateras att stålets inverkan inte enbart kunde beräknas utifrån dess areaandel.

En teori var att förenkla formeln till att endast räkna med två flödesvägar i U-värdesmetoden, *Flödesväg 1* och *2* som presenteras i Figur 4.10. *Flödesväg 1* och *2* är de flödesvägar då värmen endast passerar isolering eller endast stål i installations- och primärskikt. Hypotesen som utvärderades var att de två flödesvägarna skulle vara så dominerande att de andra två flödesvägarna helt kunde försummas. Detta visade sig vara felaktigt, felet som uppstod, mellan de simulerade värdena från HEAT3 och U-värdesformeln, i detta försök landade på $\pm 9\%$ vilket inte ansågs som en godtagbar felmarginal.

En tredje teori för hur U-värdesformeln skulle anpassas var att lägga till en konstant i formeln för *Flödesväg 2*. Tanken var då att denna konstant skulle ta hänsyn till det komplexa utseendet i korspunkten för regeln i primärskiktet och regeln i installationsskiktet och addera ett motstånd för detta. Förhoppningen var att detta skulle leda till ett mer rimligt värde på det ekvivalenta lambdavärdet för stålet. Denna modell gav dock ett betydligt större fel och fick därför uteslutas.

I den slutliga U-värdesmodellen som valdes har stålandelen i skikten bestämts av godstjockleken. En teori som även undersöktes var att regelflänsarna skulle ha sådan påverkan på de utanpåliggande materialskikten att det istället var de som skulle bestämma areaandelen för flödesvägen. Stålets godstjocklek togs då istället hänsyn till i respektive delmotstånd för installationsskikt och primärskikt då det ansågs orimligt att regelflänsarnas storlek skulle vara dimensionerande även i de skikten. Då detta gav en betydligt större areaandel för *Flödesväg 1*, *2* och *3*, var det i detta fall tvunget att dra bort dessa andelar från *Flödesväg 1* som i övriga fall antagits utgöra 100 % av arean. Denna anpassning gav ett rimligare värde på det ekvivalenta lambdavärdet för stålet, koefficient A_2 , men modellen gav dock ett sämre resultat på felmarginalen och valdes därför bort.

6.6 Felkällor

I HEAT3-modellerna har en del förenklingar gjorts, såsom plastfolien som tidigare nämnts. Ytterligare en förenkling är infästningarna av fasadskivan. Denna fästs, om det är en tegelfasad, med små punktfästen genom fasadskivan in i stålreglarna i primärskiktet. Varje fäste bidrar med en köldbrygga som valdes att bortse ifrån, vilket innebär att HEAT3-modellen har ett marginellt lägre värmefflöde jämfört med om infästningen hade inkluderats. Om fasaden istället är av exempelvis trä kan det krävas regler i siktet med fasadskivan för infästning av fasadskiktet. Detta bidrar med en betydligt större köldbrygga i förhållande till infästningen vid en tegelfasad och även då ett större fel mot de simulerade värdena i HEAT3.

I modeller som endast inkluderar materialskikt fram till luftspalten sätts det yttre övergångsmotståndet till det inre enligt ISO-standard. I HEAT3-modellerna användes dock det yttre övergångsmotståndet på väggens utsida, vilket orsakar ett marginellt högre värmefflöde genom väggen.

Regressionsanalysen är uppbyggd på simulerade värden från HEAT3, detta bidrar till en ytterligare felkälla då de simulerade värdena även är en förenkling av verkligheten. Även om formeln uppger en noggrannhet på tre decimaler bör man ha i åtanke att de konstruktioner som produceras idag inte har möjlighet till samma noggrannhet.

Vid jämförelsen mot leverantörerna har Europrofil uppgett i vissa konstruktionslösningar även ha en Z-regel i fasadskivan. Denna har bortsetts ifrån i jämförelsen då europrofil ej uppgett i vilka fall denna Z-regel har ingått eller ej. En Z-regel i fasadskiva skulle dock innebära att U-värdet blev betydligt högre.

Den mänskliga faktorn är en felkälla som förekommer i både simuleringarna i HEAT3 samt vid framtagningen av U-värdesformeln. HEAT3 har ingen "snap"-funktion vilket gör att koordinaterna för varje material måste skrivas in manuellt, det kan då vara svårt att upptäcka om ett material ligger någon millimeter fel i programmet. U-värdesformeln togs fram i Excel vilket har nackdelen att det är svårt att felsöka när många celler beror av varandra. Med många ingående parametrar och ett stort antal data-värden kan det förekomma fel, dock tenderar större fel att sticka ut, vilket gör dem lättare att identifiera.

7. Slutsatser

Med problemformuleringarna som grund sammanfattas resultatet och analysen i detta kapitel. Kapitlet lämnar även förslag på eventuella fortsatta studier inom ämnesområdet.

Vilka parametrar påverkar främst värmeflödet genom en vägg med slitsade stålreglar?

I studier som tidigare genomförts har slitsflänsarna som tillkommer vid skurna slitsar bortsetts ifrån då dess bidrag till värmeflödet ansågs vara försumbart. Parameterstudien som genomfördes i detta arbete visade på att dessa flänsar har en betydande inverkan och när kraven skärps kan små procentenheter avgöra om kraven uppfylls eller ej. Skillnaden i värmeflöde mellan det stansade regelfallet och det skurna regelfallet ligger i snitt på 6 %. Den maximala skillnaden uppgick till 9 % och som minst till 0,5 %, båda dessa värden kommer från parameterstudien för fasadskivan. Regeln med skurna slitsar ger alltid ett högre värmeflöde, detta är naturligt då denna regel innehåller en större mängd stål vilket har en betydligt högre värmeledningsförmåga än isolering och luft.

Fasadskivan visade sig även vara den parameter som har störst inverkan på värmeflödet genom en slitsad stålregelvägg. Parameterstudien visar att fasadskivan kan minska värmeflödet med 11 %, detta när väggen går från att inte ha någon fasadskiva alls till ett tillägg på en fasadskiva på 15 mm. Den parameter som påverkar värmeflödet minst är godstjockleken, denna parameter var även den enda som visade ett linjärt beteende. Utöver dessa parametrar så påverkar även installationsskiktets och primärskiktets tjocklek väggens värmeflöde.

Är det möjligt att förenkla beräkningen av värmeflödet genom en slitsad stålregelvägg baserat på tredimensionella simuleringar?

De slitsade stålreglarna ger ett komplext tredimensionellt värmeflöde som det i dagsläget inte finns en standard för hur det ska behandlas i en handberäkning. Den standard som berör problemet hänvisar till tredimensionella simuleringar för att bestämma värmeflödet i konstruktioner med genomgående metall. U-värdesmetoden som annars anges som standard vid U-värdesberäkningar kan inte hantera slitsade stålreglar då stålets lambdavärde skiljer sig kraftigt från isoleringens lambdavärde. Arbetet med att anpassa U-värdesmetoden för slitsade stålreglar har därför genomförts och resulterade i tre olika formler för olika regeldimensioner. Dessa har en felmarginal på $\pm 3,5$ % med vissa begränsningar för de oberoende parametrarna. En viktig begränsning är att värmeflödet för väggkonstruktioner utan fasadskiva inte kan beräknas med formeln då fasadskivan har en så pass stor effekt på värmeflödet att formeln inte

kan anpassas till att hantera denna variation. Slutsatsen av arbetet blir därför att den slitsade stålregelns komplexa utseende och höga lambdavärde i förhållande till de övriga ingående materialen gör det svårt att förenkla värmeflödesberäkningen till en lika generell U-värdesmetod som finns för träregelkonstruktioner.

Hur väl stämmer dagens beräkningsmetoder överens mot tredimensionella beräkningar?

Förstudien visade att en av de metoder som används i dagsläget vid energiberäkning av slitsade stålreglar är att anta att stålregelväggen har ett beteende som liknar träregelväggen. Jämförelsen som genomfördes för att visa hur denna metod ställer sig mot en tredimensionell simulering av en slitsad stålregelvägg visar att en träregelkonstruktion generellt har ett lägre värmeflöde än en stålregelkonstruktion. Hur mycket lägre värmeflödet är för en träregelkonstruktion varierar med både typen av slits i stålregeln och med väggens uppbyggnad. Skillnaden i värmeflöde mellan stålregelkonstruktionen och träregelkonstruktionen varierade mellan 4 - 17 %.

I förstudien framkom det även att leverantörernas angivna U-värden i vissa fall används. Vid jämförelsen mellan de U-värden leverantörerna presenterar och de tredimensionella simuleringarna i HEAT3 kan slutsatsen dras att för jämförelsen mot Europrofil stämmer U-värdena bra överens med de tredimensionella simuleringarna. Jämförelsen mot Gyproc visade dock inte samma säkerhet, där de tredimensionella simulerade värdena skiljer sig väsentligt mycket mer än vid jämförelsen mot Europrofil. Modellen i HEAT3 har dock anpassats efter Europrofils regler då Gyproc inte redovisar några dimensioner för sina regler. Detta gör att det är svårt att göra en helt rättvis bedömning av Gyprocs redovisade U-värden. Slutsatsen blir att om väggkonstruktionen är uppbyggd på samma sätt som Europrofils redovisade väggkonstruktioner går dessa att använda då de visar en väldigt låg felmarginal. För väggkonstruktioner som leverantören inte redovisar några U-värden för är det dock svårt att göra en god uppskattning av U-värdet då parametrarna inte varierar linjärt och även påverkar varandra.

7.1 Fortsatta studier

I parameterstudien genomfördes endast en analys för hur parametrarna beter sig oberoende av varandra men det hade även varit intressant att se hur parametrarna beror av varandra. Det hade även bidragit med en större förståelse kring hur stålreglarnas beteende förhåller sig till de resterande ingående materialen i väggkonstruktionen och samtidig möjligen bidra till en ännu bättre anpassning av U-värdesmetoden till U-värdesformeln.

Då en relativt liten andel av möjliga väggkonstruktioner simulerats i HEAT3 hade U-värdesformeln kunnat utvecklas vidare genom att genomföra fler simuleringar. Detta hade gett en större säkerhet i formeln och underlättat arbetet av modellens anpassning. Utöver detta hade

även arbetet med anpassningen av formeln kunnat fortsättas. I arbetet har flera olika anpassningar testats men det hade exempelvis även varit intressant att se hur ett medelvärde av en anpassad U-värdesmetod och en anpassad lambdavärdesmetod hanterar problemet.

Detta arbete har inte berört väggens övriga köldbryggor. Det hade varit en intressant påbyggnad av detta arbete för att få en mer komplett bild av stålregelväggens U-värde. För träregelväggar innefattar U-värdet för ytterväggen oftast syllen, hammarbandet och kortlingarnas bidrag till U-värdet. Utöver dessa finns det även köldbryggor såsom hörn, fönster- och dörrinfästningar som behöver utredas.

En stor brist är även att det saknas faktiska mätningar på stålregelväggar att tillgå, vilket gör det svårt att bedöma de tre dimensionella simuleringarnas felmarginaler. För att med säkerhet kunna bestämma värmeflödet genom en stålregelvägg hade det därför behövt göras mätningar på slitsade stålregelväggar med en HotBox.

8. Referenser

- Berk, R. (2004). *Regressions Analys: A constructive Critique*. London: Thousand Oaks
- Blomberg, T. (1996). *HEAT KONDUKTION IN TWO AND THREE DIMENSIONSONS Computer Modelling of Building Physics Applications*. Lund: Wallin & Dalholm Boktryckeri AB
- Blomberg, T. (2000). *HEAT2. A PC-program for heat transfer in two dimensions. Manual with brief theory and examples*. http://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT2_5.pdf
- Blomberg, T. (2001). *HEAT3. A PC-program for heat transfer in three dimensions. Manual with brief theory and examples*. http://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT3_4.pdf
- Brown, Angus M. (2000). *A step-by-step guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet*. Seattle: Elsevier
- Buildingphysics (u.å.). *ISO 10211:2007 validation of HEAT2 7.0/HEAT3 5.0*. http://www.buildingphysics.com/download/iso/ISO_10211_HEAT2_HEAT3.pdf
- Burström, P. G. (2007). *Byggnadsmaterial*. Lund: Studentlitteratur
- De Angelis, E & Serra, E. (2013) *Light steel-frame walls: thermal insulation performance and thermal bridges*. Milan: Elsevier
- Europrofil (2017a). *U-värden*. <http://www.europrofil.se/index.php/system/fasadsystem-recon/recon-original/u-varden> [2017-11-22]
- Europrofil (2017b). *Produktkatalog 34*. http://www.europrofil.se/images/uploads/pdf/Europrofil_Katalog_34.pdf
- Europrofil (u.å.). *Allmänt om ytterväggar*. <http://www.europrofil.se/index.php/system/ytervagggar> [2017-10-24]
- Gorgolewski, M. (2007). *Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing*. Toronto: Elsevier
- Gyproc (2015). *Produktdatablad Gyproc GNE 13 Normal Ergo Gyproc GN 13 Normal*. http://gyproc.se/sites/gypsum.nordic.master/files/gyproc-site/document-files/PRI_NormalGipsskiva_SE.pdf
- Gyproc (2010a). *Produktdatablad Glasroc GHUE 13 Hydro Ergo, Glasroc GHU 13 Hydro*. http://old.gyproc.se/files/PDF/Sweden/PRD/SE_GHUEGHUDataBlad.pdf
- Gyproc (2010b). *Gyproc handbok 8, Handboken i lättbyggnadsteknik*. Uppl. 1. Båstad: Gyproc AB

- Hedin, J. (1993). Att bygga i stål. I Hedin, J. & Lundin, K. (red.) *Stålbyggnad*. Stockholm: Stålbyggnadsinstitutet, ss. 17-23.
- Nevander, L-E. & Elmarsson, B. (2006). *Fukthandbok: praktik och teori*. 3. utg. Stockholm: Svensk Byggtjänst.
- Merriam, S, B. (1994) *Fallstudien som forskningsmetodik*. Lund: Studentlitteratur AB
- Patel, R. & Davidsson ,B. (2011). *Forskningsmetodikens grunder*. 4. Uppl. Studentlitteratur AB, Lund.
- Petersson, B-E. (2013). *Tillämpad Byggnadsfysik*. Lund: Studentlitteratur AB
- Sandin, K. (2010). *Praktisk byggnadsfysik*. Lund: Studentlitteratur AB
- Skoglund, E. & Flemström, M. (2012). *Trä- och stålreglars påverkan av värmeflödet i utfackningsväggar*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:536991/FULLTEXT02.pdf>
- Swedish Standards Institut (SIS) (2017a). *SS-EN ISO 6946:2017. Byggkomponenter och byggnadsdelar – Värmemotstånd och värmegenomgångskoefficient – Beräkningsmetod (ISO 6946:2017)*. Stockholm: SIS.
- Swedish Standards Institut (SIS) (2017b). *SS-EN ISO 10211:2017. Köldbryggor i byggnadskonstruktioner – Värmefflöde och yttemperaturer – Detaljerade beräkningar (ISO 10211:2017)*. Stockholm: SIS.
- Wallgren, H. (2016). *Slitsade stålreglar för fönstermontage*. <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1046784/FULLTEXT01.pdf>

Bilaga 1. Intervjumall förstudie

Allmänt

Ge en kort beskrivning om dig och din roll på företaget

Vad har du för tidigare erfarenheter av U-värdes- och köldbryggeberäkningar för slitsades stålreglar?

Energiberäkningar

Vid ett projekt som använder slitsade stålreglar, hur tas informationen kring U-värden och köldbryggor fram? Är det via leverantörer eller beräknas det av er?

Hur mycket använder ni slitsade stålreglar i era projekt?

Upplevs det vara några problem kring energiberäkningar med slitsade stålreglar i dagsläget?

Upplever du att frågan om hur energiberäkningar för slitsade stålreglar har utretts tillräckligt för de energikrav som finns i dagsläget?

Leverantörer

Vilken information delar leverantörerna med sig av?

Lambdavärde på stål?

Slitsbredd? Slitshöjd?

Godstjocklek?

Avslutning

Har du några övriga kommentarer du vill tillägga?

Bilaga 2. Tabellerade HEAT3-simuleringar för stålreglar med skurna slitsar

Regeldim. [mm]	Godstjock. [mm]	Installation. [mm]	Fasad. [mm]	λ primär [W/mK]	λ fasad [W/mK]	c/c [mm]	U-värde [W/m ² K]
170	1,0	0	0	0,036	0,033	450	0,2806
170	1,0	0	0	0,037	0,037	600	0,2621
170	1,0	0	50	0,036	0,033	450	0,1924
170	1,0	0	80	0,036	0,033	450	0,1636
170	1,0	0	100	0,036	0,033	450	0,1488
170	1,0	15	50	0,036	0,033	450	0,1799
170	1,0	30	50	0,036	0,033	450	0,1721
170	1,0	45	0	0,036	0,033	450	0,2259
170	1,0	45	15	0,036	0,033	450	0,2016
170	1,0	45	15	0,036	0,033	450	0,1244
170	1,0	45	30	0,036	0,033	450	0,1838
170	1,0	45	50	0,036	0,033	450	0,1651
170	1,0	45	50	0,037	0,037	600	0,1606
170	1,0	45	65	0,036	0,033	450	0,1534
170	1,0	45	80	0,036	0,033	450	0,1434
170	1,0	45	100	0,036	0,033	450	0,1319
170	1,0	45	100	0,037	0,032	450	0,1318
170	1,0	60	50	0,036	0,033	450	0,1595
170	1,0	70	30	0,036	0,033	600	0,1585
170	1,0	70	50	0,032	0,031	600	0,1319
170	1,0	70	50	0,036	0,033	450	0,1563
170	1,0	95	50	0,036	0,033	450	0,1495
170	1,0	95	80	0,036	0,033	600	0,1215
170	1,2	45	50	0,036	0,033	450	0,1682
170	1,2	45	100	0,036	0,033	600	0,1256
170	1,2	95	30	0,036	0,033	600	0,1521
170	1,2	95	30	0,036	0,033	600	0,1517
170	1,2	95	100	0,032	0,03	600	0,1053
170	1,5	45	30	0,035	0,029	600	0,1701
170	1,5	45	50	0,036	0,033	450	0,1722
170	1,5	45	80	0,036	0,033	600	0,1390
170	1,5	45	80	0,036	0,033	600	0,1387
170	1,5	70	30	0,034	0,029	450	0,1719
170	1,5	70	30	0,036	0,033	450	0,1816

Regeldim. [mm]	Godstjock. [mm]	Installation. [mm]	Fasad. [mm]	λ primär [W/mK]	λ fasad [W/mK]	c/c [mm]	U-värde [W/m²K]
170	2,0	45	50	0,036	0,033	450	0,1800
170	2,0	70	100	0,036	0,033	600	0,1244
170	2,0	95	0	0,036	0,033	450	0,2254
195	1,0	0	30	0,036	0,033	450	0,1964
195	1,0	45	0	0,036	0,033	450	0,2023
195	1,0	45	0	0,037	0,037	600	0,1871
195	1,0	45	30	0,036	0,033	450	0,1679
195	1,0	45	50	0,036	0,033	450	0,1521
195	1,0	45	80	0,036	0,033	450	0,1334
195	1,0	45	80	0,036	0,033	600	0,1253
195	1,0	45	80	0,037	0,037	600	0,1317
195	1,0	45	100	0,036	0,033	450	0,1235
195	1,0	70	100	0,036	0,033	600	0,1110
195	1,2	70	80	0,036	0,033	600	0,1207
195	1,2	70	80	0,036	0,033	600	0,1204
195	1,2	95	30	0,032	0,03	450	0,1430
195	1,2	95	30	0,034	0,032	600	0,1342
195	1,2	95	30	0,036	0,033	450	0,1551
195	1,5	0	80	0,035	0,03	600	0,1415
195	1,5	70	30	0,036	0,033	600	0,1521
195	1,5	95	80	0,036	0,033	450	0,1279
195	1,5	95	100	0,036	0,033	600	0,1098
195	1,5	95	100	0,036	0,033	600	0,1096
195	2,0	45	30	0,036	0,033	600	0,1682
195	2,0	70	50	0,032	0,031	600	0,1323
195	2,0	70	100	0,035	0,03	450	0,1215
195	2,0	70	100	0,036	0,033	450	0,1276
195	2,0	95	100	0,036	0,033	450	0,1232
220	1,0	45	50	0,036	0,033	450	0,1443
220	1,0	95	30	0,036	0,033	600	0,1305
220	1,0	95	50	0,036	0,033	450	0,1322
220	1,0	95	100	0,036	0,033	600	0,1019
220	1,2	0	50	0,035	0,03	600	0,1513
220	1,2	0	100	0,036	0,033	450	0,1347
220	1,2	45	30	0,036	0,033	450	0,1587
220	1,2	45	100	0,036	0,033	600	0,1126
220	1,2	70	30	0,035	0,032	450	0,1464
220	1,2	70	30	0,036	0,033	450	0,1496
220	1,2	95	0	0,036	0,033	450	0,1670
220	1,2	0	0	0,036	0,033	450	0,2375
220	1,5	45	30	0,036	0,033	600	0,1529
220	1,5	45	80	0,032	0,029	450	0,1210
220	1,5	45	80	0,036	0,033	450	0,1331

Regeldim. [mm]	Godstjock. [mm]	Installation. [mm]	Fasad. [mm]	λ primär [W/mK]	λ fasad [W/mK]	c/c [mm]	U-värde [W/m²K]
220	1,5	45	100	0,036	0,033	450	0,1231
220	1,5	45	100	0,037	0,037	600	0,1208
220	1,5	70	0	0,036	0,033	450	0,1921
220	1,5	70	0	0,037	0,037	600	0,1729
220	1,5	95	80	0,034	0,029	600	0,1054
220	2,0	45	0	0,036	0,033	450	0,2220
220	2,0	70	30	0,036	0,033	600	0,1497
220	2,0	70	50	0,036	0,033	450	0,1522
220	2,0	70	80	0,036	0,033	600	0,1211
220	2,0	70	100	0,033	0,03	600	0,1047
220	2,0	70	100	0,036	0,033	450	0,1234
220	2,0	95	80	0,036	0,033	450	0,1286
220	2,0	95	100	0,036	0,033	450	0,1193
250	1,0	45	0	0,036	0,033	450	0,1776
250	1,0	45	30	0,036	0,033	450	0,1493
250	1,0	45	50	0,036	0,033	450	0,1365
250	1,0	45	100	0,036	0,033	450	0,1129
250	1,0	45	80	0,036	0,033	450	0,1213
250	1,0	70	30	0,036	0,033	600	0,1289
250	1,0	70	50	0,036	0,033	450	0,1306
250	1,0	70	50	0,037	0,037	600	0,1243
250	1,0	70	80	0,036	0,033	600	0,1074
250	1,0	95	0	0,036	0,033	450	0,1598
250	1,0	95	100	0,036	0,033	450	0,1047
250	1,2	0	50	0,035	0,029	600	0,1404
250	1,2	45	30	0,033	0,03	600	0,1302
250	1,2	45	80	0,036	0,033	450	0,1244
250	1,2	45	100	0,036	0,033	600	0,1071
250	1,2	95	80	0,036	0,033	450	0,1156
250	1,5	45	80	0,036	0,033	600	0,1172
250	1,5	70	80	0,036	0,033	450	0,1228
250	1,5	70	80	0,037	0,029	450	0,1193
250	1,5	70	100	0,036	0,033	450	0,1143
250	1,5	70	100	0,037	0,037	600	0,1067
250	1,5	95	30	0,034	0,032	600	0,1244
250	1,5	95	30	0,036	0,033	450	0,1456
250	2,0	0	30	0,036	0,033	450	0,1976
250	2,0	95	50	0,034	0,031	450	0,1345
250	2,0	95	50	0,036	0,033	450	0,1400
250	2,0	95	50	0,036	0,033	600	0,1240
250	2,0	95	80	0,036	0,033	600	0,1111
250	1,0	70	0	0,036	0,033	450	0,1678
250	1,2	0	80	0,036	0,033	450	0,1391

