

Köldbryggor i lågenergihus

Byggnadssystemens inverkan
på transmissionsförluster

Mikael Danebjer
Tomas Ekström

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2012
Rapport TVIT--12/5032



Lunds Universitet

Lunds Universitet, med nio fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 100 400 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 000 anställda och 41 000 studerande som deltar i ett 90-tal utbildningsprogram och ca 1000 fristående kurser erbjudna av 88 institutioner.

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmade hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspredning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Köldbryggor i lågenergihus

Byggnadssystemens inverkan
på transmissionsförluster

Mikael Danebjer
Tomas Ekström

Nyckelord:

Köldbryggor, lågenergihus, HEAT, värmeflöde, termografering,
thermal bridges, heat flux, low energy houses.

© *Mikael Danebjer och Tomas Ekström*
ISRN LUTVDG/TVIT--12/5032--SE(105)

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

I. Sammanfattning

I framtiden kommer det ställas strängare krav på energianvändningen och ett första steg att reducera denna är att effektivisera byggnaders förmåga att behålla värme. Värmeförluster sker i huvudsak som transmissionsförluster genom byggnadsdelar och när husens klimatskal blir alltmer isolerade sker en större del av dessa förluster genom byggnadens övriga detaljer såsom fönster, dörrar, kanter, balkonger och andra svårisolerade komponenter. Syftet med denna rapport är att beräkna hur stor andel av transmissionsförlusterna som köldbryggorna utgör i några typiska lågenergibyggnader samt rangordna dessa efter hur stora de är. Frågeställningen kretsar även kring att bedöma användbarheten av ett schablonvärde för andelen köldbryggor i moderna byggnader.

Som grundläggande teori betraktas principer för värmeöverföring genom byggnader som Swedisols Isolerguide och andra aktörer på marknaden använder sig av. Ett examensarbete där den teoretiskt bästa beräkningsmetoden tagits fram visar på samma principer och används som underlag.

För att göra beräkningar och antaganden trovärdiga granskas tre referensobjekt av olika karaktär, vilka utgör underlag i form av ritningar, beräkningsvärden samt kontroll mot uppmätta värden. Dessa är Björka som är ett område med flerfamiljshus i två våningar bestående av sandwichelement, Portvakten som har en stomme av massivträ samt Beckomberga vars stomme är en kombinerad stål och betongkonstruktion. Utöver dessa tre referensobjekt har även en förbättrad lösning för kantbalk undersökts från ett område med småhus som heter Vallda Heberg.

Med hjälp av underlaget från referensobjekten kan datorsimuleringar i beräkningsprogrammen HEAT2 och HEAT3 utföras för att ta fram olika detaljers värmeöverföring. För att öka tillförlitligheten på HEAT-beräkningarna utförs först några känslighetsanalyser av modellering i programmet för att avgöra lämpliga modellparametrar, så att de värden som beräknas inte blir beroende av modelleringsmetod.

I denna rapport definieras köldbryggorna för en byggnad av fönster- och dörranslutningar, balkonger samt husets alla kanter och hörn i klimatskalet. För varje referensobjekt presenteras köldbryggornas individuella andel och en tydlig trend är att kantbalkar och fönsteranslutningar utgör detaljerna med de största transmissionsförlusterna. Resultaten av beräkningarna visar att köldbryggan i en konstruktionsdel kan variera väldigt mycket beroende på utformningen. Kantbalken hos de olika referensfallen ger ett värde mellan 0,0754 och 0,3950 W/(m·K).

Känslighetsanalyser för några utvalda detaljer utförs, för att visa på vilka egenskaper som är avgörande för att reducera transmissionsförlusterna genom köldbryggor. Kantbalkens isolermängd och bjälklagets tjocklek är två exempel på variabler som får stor inverkan på köldbryggornas transmissionsförluster. En känslighetsanalys över

hur köldbryggorna varierar bland annat beroende på byggnadens form, storlek och hur stora fönster som används görs och visar på skillnader mellan valen av stomsystem.

Slutsatsen är att användning av en schablon för andelen köldbryggor i en byggnad är en ytterst osäker metod. Om en schablon används för lågenergihus bör denna vara runt 35-40% av de totala transmissionsförlusterna vilket skulle betyda en överskattning där lösningarna för köldbryggorna är väl genomtänka. Av variationen i beräkningarna att döma vore den bästa metoden därför att alltid beräkna köldbryggorna var för sig, hellre än användandet av schablonvärden, om möjligheten finns. Om schablonvärden skulle införas, vore det lämpligt att göra en utredning på flera olika byggnadstyper, med ett stort statistisk underlag för att omfatta de stora mängder variationer på lösningar som finns.

Vid beräkning av köldbryggor visade det sig att kantbalken var den köldbrygga som hade störst transmissionsförluster och fönsteranslutningar visade sig utgöra störst andel av transmissionsförlusterna genom köldbryggor. Några analyser visar på att fönsteranslutningens transmissionsförluster minskar när fönstret blir större men ökar när U-värdet ökar. En annan analys visar att användandet av en bättre isolerad kantbalk som utvecklats för NCC:s småhus kan sänka andelen köldbryggor med upp till 8,2 procentenheter i referensobjekten.

II. Abstract

In the future there will be greater demands for power consumption. A first step to reduce this demand is to slow the heat transfer rate of the building. Heat loss occurs primarily through transmission losses through building elements with the building envelopes becoming increasingly insulated, these losses increase through the buildings other features, such as windows, doors, floors, balconies and other less insulated components. The purpose of this report is to provide the percentage of transmission losses via thermal bridges in typical Swedish low-energy buildings and rank them according to how large they are. The issue revolves around the usefulness of a standard deduction to judge the proportion of thermal bridges in modern buildings.

As underlying theories of the principle of heat flow through buildings, Isolerguiden presents a theory that summarizes the relevant aspects. A thesis in which the theoretically best calculation method for these types of calculations is investigated weighs heavily in the report.

To make estimates and assumptions credible, three reference objects are examined, which constitute baselines in the form of drawings, calculation and values to compare to measurements. These are Björka which is an area of apartment blocks on two floors consisting of sandwich element, Portvakten which has a frame of solid wood, and Beckomberga whose frame is a steel and concrete structure. In addition to these three reference objects the foundation beam is studied from an area of small houses called Vallda Heberg.

Using information from the reference objects, computer simulations are done in two programs, HEAT2 and HEAT3. Models of the different solutions are made to calculate the heat flux through each part, and the thermal bridges are calculated for each object. To increase reliability of the HEAT calculations a sensitivity analysis of modeling in the program is done, so that the calculated values are not dependent on the modeling methodology.

In this report, representative thermal bridges for a building are considered to be windows, doors, balconies, and all the edges and corners of a house. For each reference object the thermal bridges are presented individually and an obvious trend is that foundation beams and windows are the details with the largest thermal losses. The results of these calculations show that the thermal bridge in a structural component can vary greatly depending the on construction. For example, the foundation beam differs between 0.0754 and 0.395 W/(m·K) within the reference cases.

Sensitivity analyses for some selected elements are done, to show which properties are effective in reducing the transmission losses. The thermal insulation at the foundation beam and slab thickness are two examples of variables that have a

significant impact on transmission losses. Sensitivity analyses of how thermal bridges can vary depending on factors such as building form, size and window size show the variation between different frames and material choices.

The conclusions from this study are that the use of a standard deduction for determining the proportion of thermal bridges in a building is an extremely unreliable method. To be on the safe side this value should be around 35-40% of total transmission losses which would mean an exaggeration in the cases where solutions for thermal bridges were developed to minimize the heat loss. Due to the variation in estimates the best method is to always calculate thermal bridges separately, rather than the use of a standard deduction, if available. If a standard deduction are to be used, it would be appropriate to conduct an investigation of greater magnitude and variety of building types, to achieve a large statistical basis and cover the large amount of variations for the available solutions.

The calculations in this report show that the highest flow of a single component is through the foundation beam, however the window connections is the largest share of heat losses through thermal bridges. Some analyses indicates that the heat losses through window connections are reduced when window area is increased or when the U-value is lowered. Another analysis shows a decrease of 8 percentage units in losses through foundation beams when a new beam from project Vallda Heberg is used.

III. Förord

Vi skrev detta examensarbete för NCC Teknik våren 2012, i Malmö och Lund. Detta utgör den avslutande delen av civilingenjörsutbildningen Väg- och Vattenbyggnad på Lunds Tekniska Högskola, LTH och omfattar 30 högskolepoäng. Vi ville skriva en teknisk rapport som fokuserar på moderna byggnader ur energisynpunkt med nya smarta lösningar då utvecklingen av det moderna byggandet intresserar oss. Denna rapport fokuserar inte på de nya lösningarna, men identifierar de områden där de nya lösningarna bör tas fram och där de stora värmeförlusterna sker.

Arbetet med rapporten har varit mycket lärorikt, där det inledande arbetet med att ta fram frågeställning och fokusera på huvuduppgiften varit en utmaning. Andra svårigheter som mött oss är valet av referensobjekt och vilka begränsningar som varit lämpliga att göra. Att välja vilka teorier, detaljer samt modeller som ur vårt perspektiv är de bästa har krävt många diskussioner och resonemang.

Vi tackar särskilt NCC som velat guida oss med detta examensarbete och de viktiga personer som varit handledare och stöd:

Andreas Hägg, NCC, Handledare

Hans Bagge, LTH, Handledare

Stephen Burke, NCC, LTH

Dennis Johansson, Examinator

Hans Söderling, NCC

Och alla andra som har varit till hjälp med konsultation och frågor.

IV. Innehållsförteckning

I. Sammanfattning	3
II. Abstract	5
III. Förord	7
V. Terminologi.....	10
1. Inledning	11
1.1 Bakgrund.....	11
1.2 Syfte	11
1.3 Avgränsningar	12
2. Litteraturstudie & teori.....	13
2.1 Litteraturstudie av köldbryggsundersökningar	13
2.2 Energieffektiviseringstrappan & energibalans	15
2.3 Köldbryggor och dess egenskaper	16
2.4 Olika metoder för köldbryggsberäkningar	20
2.5 BBR – Boverkets byggregler	21
2.6 Kravspecifikation – Lågenergihus	22
3. Struktur & metod	27
3.1 Rapportstruktur	27
3.2 Metod	28
4. Beräkningsmetoder	29
4.1 Beräkning av köldbryggor	29
4.2 Beräkningsmodeller för köldbryggor	32
4.3 Beräkningsmetod – Andel köldbryggor	38
4.4 Förutsättningar för beräkning av VFT	39
5. Referensobjekt	41
5.1 Underlag & kriterier för urval	41
5.2 Beckomberga	42
5.3 Björka.....	43
5.4 Portvakten	45
5.5 Sammanställning av mått	46
5.6 Typritningar	47
5.7 Vallda Heberg	47

6.	HEAT	49
6.1	Programmet HEAT	49
6.2	HEAT – Programparametrar	50
6.3	HEAT – Modellparametrar	57
6.4	Förutsättningar – Referensobjekt	59
7.	Resultat	61
7.1	Beräkningsresultat – köldbryggor	61
7.2	Sammanställning av andel köldbryggor	66
7.3	Jämförelse med beräkningsmodellen	67
8.	Analys	73
8.1	Variationer i detaljer	73
8.2	Andelar köldbryggor – olika hustyper	79
8.3	Jämförelse av resultat	84
9.	Diskussion	85
9.1	Beräkningsresultat från referensobjekt	85
9.2	Känslighetsanalys & förbättringspotential	88
9.3	Termografering	89
9.4	Osäkerheter i underlag & HEAT	89
9.5	Framtiden – 10-års perspektiv	89
9.6	Generalisering via procentsatser	90
9.7	Kravspecifikationer	90
9.8	Förslag på framtida utredningar	91
10.	Slutsats	93
11.	Referenser	95
12.	Bilaga – Beräkningar	97
	Beräkningar för HEAT–analyser	97
	Beräkningar referensobjekt	103

V. Terminologi

A_{temp}	Avser golvarean i temperaturreglerade utrymmen avsedda att värmas till mer än 10 °C, begränsad av klimatskärmens insida. [m ²]
BOA	Area av bostad, avgränsad av omslutande väggars insidor. Viss del av tjocka innerväggar och schakt räknas bort.
BBR	Boverkets byggregler, föreskrifter och råd som styr byggandet i Sverige.
DUT	Dimensionerande utetemperatur, den temperatur vid vilken effektbehovet under ett år beräknas. [°C]
DVUT	Dimensionerande vinterutetemperatur, den temperatur vid vilken värmeförlusttalet beräknas. [°C]
FEBY	Forum för energieffektivt byggande, en organisation i Sverige som certifierar passivhus enligt sina normer.
Internvärme	Tillskott av värmeenergi från hushållsapparater och personer i byggnaden.
VFT	Värmeförlusttalet beräknas som summan av byggnadens värmeförluster via transmission, ventilation och infiltration (luftläckning via klimatskärm). [W/m ² , A_{temp}]
Transmission	Transmission avser värmeflödet genom material. [W]
U-värde	Värmegenomgångskoefficient, de isolerande egenskaperna genom ett skikt, d.v.s. summan av värmegångsmotstånden. U-värdet betecknas som $\frac{1}{\sum R}$. [W/(m ² ·K)]
UA	Transmissionsförluster genom klimatskal, U-värdet multiplicerat med omslutningsarean. [W/K]
P_{eff}	Effektbehovet hos en byggnad som baserar sig på energibehov, läckage, ventilation och gratisvärme.
R	Värmegenomgångsmotstånd, ett materials förmåga att motstå energitransport med hänsyn till tjocklek. [(m ² ·K)/W]
λ	Värmekonduktivitet, ett materials förmåga att leda värme. [W/(m·K)]
Ψ	Psi, beteckning för linjeköldbryggor. [W/(m·K)]
χ	Chi, beteckning för punktköldbryggor. [W/K]

1. Inledning

I detta kapitel beskrivs kortfattat den bakgrund som motiverat rapportens syfte. Syftet definieras i form av några frågeställningar och avgränsningar beskrivs för att begränsa omfattningen av arbetet.

1.1 Bakgrund

I framtiden kommer det ställas strängare krav på energieffektivitet i byggnader. För att uppfylla dessa ökade krav finns det stora fördelar med att utvärdera dagens energieffektiva byggnader. Genom att göra dessa utvärderingar ger det återkoppling från genomförda projekt så att nytta och lärdom kan föras vidare och byggandet förbättras.

I denna rapport undersöks detaljer som utgör köldbryggor på befintliga lågenergihus och en analys utförs av vilka som kan förbättras ur energisynpunkt. Dessa köldbryggor utgör konstruktionsdelar med högre värmeledning än i de övriga delarna. Köldbryggornas relativa betydelse ökar med ökad värmeisolering, vilket gör att byggnader med mer isolering får en större andel köldbryggor (Abel, Elmroth, 2008).

Dessa köldbryggor skapar flera problem i byggnader, där den mest uppenbara är värmeförlusten. Men konsekvenserna av dåliga detaljlösningar med stora transmissionsförluster kan även bli fukt- eller komfortproblem. Med energieffektiva konstruktioner kan onödiga värmeförluster undvikas, vilket leder till minskat effektbehov, högre komfort och nöjdare kunder, vilket ger en kostnadsbesparing i slutändan.

1.2 Syfte

Målet med denna rapport är att ta fram värmeledningerna för köldbryggor i lågenergihus och beräkna hur stor andel av den totala transmissionsförlusten genom klimatskalet köldbryggorna utgör. Isoverboken och Svensk Byggtjänst anger att köldbryggor normalt utgör ett påslag på transmissionsförlusterna på mellan 20 och 30 %. Hur väl stämmer detta och vilka delar utgör de största köldbryggorna i ett typiskt flerbostadshus i lågenergiutförande? Rapporten syftar därför till följande:

- Undersöka värmeledningerna för köldbryggor i tre referensobjekt.
- Analysera vilka konstruktionsmässiga parametrar som främst påverkar värmeledningen genom köldbryggor.
- Undersöka och diskutera lämpligheten kring att använda procentuella påslag istället för beräkning av köldbryggor och vilka alternativ som finns.

1.3 Avgränsningar

Marknaden för småhus utförda som passivhus är inom NCC i skrivande stund inte lika omfattande som den för flerbostadshus varför fokus i denna rapport ligger på de större byggnaderna, men för många detaljer är principen densamma. För att begränsa arbetet undersöks köldbryggor från energieffektiva byggnader och typritningar för lågenergihus och byggnader som projekterats som passivhus utgör underlaget. Efter urval används tre huvudsakliga referensobjekt i arbetet.

Rapporten fokuserar på de krav som ställs i nuläget och vad som förväntas ske fram till år 2020 när energikraven för byggnader troligen skärps. Arbetet med att bedöma konstruktionerna ur exempelvis ekonomiska eller fukt- och konstruktionsmässiga aspekter utförs inte i denna rapport.

De datorprogram som används för att utföra värmeflödesberäkningar på köldbryggor i denna rapport är HEAT2 och HEAT3. Att genomföra HEAT-beräkningar är en tidskrävande process vilket gör att det inte finns tid för att beräkna köldbryggor för alla tjocklekar och variationer på klimatskal. Begränsningar i HEAT gör att strålningsinverkan inte kan beaktas i modellerna.

2. Litteraturstudie & teori

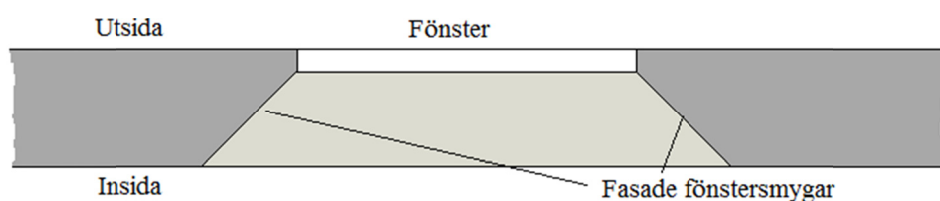
I detta kapitel sammanfattas den litteraturstudie som är grunden för frågeställningen samt den teori som beskriver principerna för energieffektivisering och energibalans. Senare beskrivs FEBY och BBR med ingående beräkningar samt effektkrav så att jämförbara värden mellan referensobjekt kan beräknas. Slutligen redovisas teorier för köldbryggor och Isolerguidens princip för beräkningar av köldbryggor.

2.1 Litteraturstudie av köldbryggsundersökningar

Det finns en del litteratur att finna kring köldbryggor och då främst hur stor andel av en byggnads totala transmissionsförluster som utgörs av köldbryggorna. I några studier kan man finna en stor variation i andelen, där byggnadstypen har en stor inverkan på köldbryggorna. I en undersökning av tre objekt, gjord vid KTH, beräknades att köldbryggorna ökar transmissionsförlusterna genom UA med mellan 21 och 47 % (Goufeng M., 1997). Enligt en utvärdering av två småhus i Västra Hamnen har köldbryggorna beräknats till 10 % av transmissionsförlusterna (Elmroth et al., 2004). Sammanfattningsvis kan sägas att andelen köldbryggor i dessa undersökningar varierar med mellan 10 och 50 %, ett förhållandevis stort intervall. Den stora variationen kan vara en effekt av att moderna byggnader designas med större värmemotstånd i klimatskalet men utan förbättringar av köldbryggorna, vilket gör att andelen köldbryggor ökar i förhållande till de totala transmissionsförlusterna.

Frågan är om det finns en medvetenhet kring köldbryggornas ökade betydelse i moderna lågenergihus, eller om tidigare normer styr beräkningarna och projekteringen av de energieffektiva byggnaderna. Som jämförelse anger både *Isoverboken* och *Byggvägledning* att köldbryggorna skulle kunna vara så stora som 20-30 % av transmissionsförlusterna (Isover, 2007 resp. Elmroth, 2007).

Mer detaljspecifika undersökningar går även att finna, bland annat ett examensarbete från LTH: "*Utvecklingen för passivhus i Sverige*", som undersöker fönsters inverkan på köldbryggorna i ett lågenergihus kallat Portvakten. Byggnaden är ett massivträhus på åtta våningar och för att få ett ökat ljusinsläpp har fönster placerats så nära fasaden som möjligt och med de vertikala fönstersmygarna avfasade, se figur 2.1. Några analyser av parametrar som de utförde för att avgöra inverkan på fönstrets köldbrygga är fönsterplacering i djupled, tilläggsisolering av karmar, fönster med lägre U-värde samt inverkan av fasade smyggar. Två slutsatser var att tilläggsisolering reducerar värmeflödet mest och fönstersmygens fasning ökar fönsterkonstruktionens totala värmeflöde med cirka 6 % (Fredlund, S. & Ranevi, C. 2010).



Figur 2.1 - Vertikala fönstersmygar i Portvakten.

Ett annat examensarbete från Chalmers undersöker två ISO-standardiserade beräkningsmetoder för kantbalkar och analyserar vilka parametrar som har störst inverkan på resultatet. Slutsatsen blev att alla parametrar inverkar på värmeflödet men storleken på kantbalken och markens värmekonduktivitet har störst betydelse, medan golvets utformning har liten inverkan (Nyberg, H. 2011).

Ibland används schablonvärden för andelen köldbryggor men det upplevs tveksamt av författarna till denna rapport och borde kopplas mer till system och byggnadsutformning. Variationen i andelar kan bero på olikheterna i undersökta referensobjekt, men även hur beräkningarna är utförda. Det verkar som om det finns brister i kunskap hur beräkningar bör utföras för att få ett så korrekt resultat som möjligt. Köldbryggors transmissionsförluster har undersökts tidigare, men efter litteraturstudien fås ett intryck av att köldbryggor i lågenergihus aldrig sammanställs ordentligt.

En slutsats av litteraturstudien är att specifika köldbryggors transmissionsförluster är utredda men att andelen köldbryggor av de totala transmissionsförlusterna inte är undersökt och definierat för olika hustyper och systemutformningar. En annan slutsats är att det är svårt att få en god uppfattning om vilka köldbryggor som bör beräknas och vilka som kan försummas.

2.1.1 Litteratur från materialtillverkare

Vilka köldbryggor som utgör den största andelen av transmissionsförlusterna är inte entydigt och materialtillverkare på marknaden vill uppmana konsumenterna att just deras produkter reducerar värmeflödet och köldbryggorna mest. Att finna en bra sammanställning eller jämförelse mellan köldbryggor kan därför vara svårt. Transmissionsförlusterna för några typiska köldbryggor i småhus har beräknats av materialtillverkare på marknaden och värden från tre av dessa sammanställs i tabell 2.1.

Tabell 2.1 - Transmissionsförluster för några köldbryggor från tre olika tillverkare.

Linjeköldbryggor	Swedisol ¹	Isover ²	Gyproc ³
	[W/(m·K)] Träregelevägg	[W/(m·K)] Träregelevägg	[W/(m·K)] Stålelevägg
Kantbalk	-	0,050 - 0,230	0,060 - 0,130
Fönsteranslutning	-	0,020	0,044 - 0,072
Bjälklagskant	0,020 - 0,040	0,020 - 0,030	0,107 - 0,260
Väggkant	0,030 - 0,060	-	0,028
Takkant	0,015 - 0,030	0,020 - 0,070	-
Mellanvägg	-	-	0,107 - 0,260

¹ (<http://rw-swedisol1.inforce.dk/sw1010.asp>).

² (<http://www.isover.se/konstruktioner/konstruktionsdetaljer>).

³ Stålelevägg i Gyproc regler, (Gyproc Handbok, 2010).

I tabellen kan både likheter och stora skillnader kan observeras. Notera att tillverkarna inte valt att redovisa alla sorters lösningar på köldbryggor och att ingen av de nämnda tillverkarna har angivit transmissionsförluster genom punktköldbryggor.

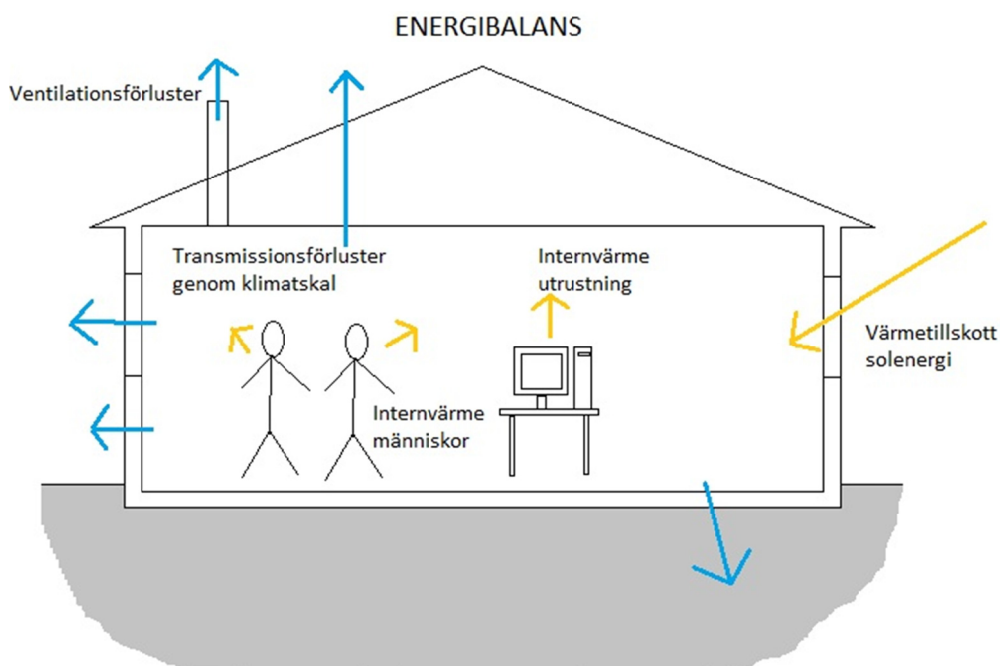
2.2 Energieffektiviseringstrappan & energibalans

Grunden i energieffektiviseringsprocessen är enligt Kyotopyramiden, vilken definierats av Bruntlandskommissionen, att reducera värmeförlusterna, se figur 2.2. Därefter kan andra energieffektiviseringsåtgärder utföras såsom utnyttjande av gratisenergi eller val av energikälla. Metoden för energieffektivt byggande baserar sig i stort på tankesättet i Kyotopyramiden, där minimeringen av värmeförluster är den första och kanske viktigaste åtgärden. I moderna byggnader riskerar köldbryggorna utgöra en allt större del av den totala energianvändningen, vilket gör arbetet kring förbättring av dessa viktigt. (Rockwool, 2011)



Figur 2.2 - Kyotopyramiden.

Att kartlägga de värmeflöden som i huvudsak utgör energibalansen i en byggnad är viktigt för att få bra inomhuskomfort och en låg energianvändning. Den tillförda värmen i en byggnad skall kompensera för de förluster som utgörs av värmeflöden genom klimatskalet. Utöver tillförd värme kan en del värmestillskott tillgodoräknas i energibalansen, där personlast, solvärme, utrustning och återvunnen värme från ventilationsluften utgör betydande delar i lågenergihus, se figur 2.3. Vid beräkning av dessa internlast och effektbehovet i byggnader kan exempelvis SVEBY användas. SVEBY är en sammanställning av standardiserade värden på brukarrelaterad indata för användning i energiberäkningar inom byggbranschen (Sveby, 2012).



Figur 2.3 - Exempel på vad som ingår i energibalansen för en byggnad.

2.3 Köldbryggor och dess egenskaper

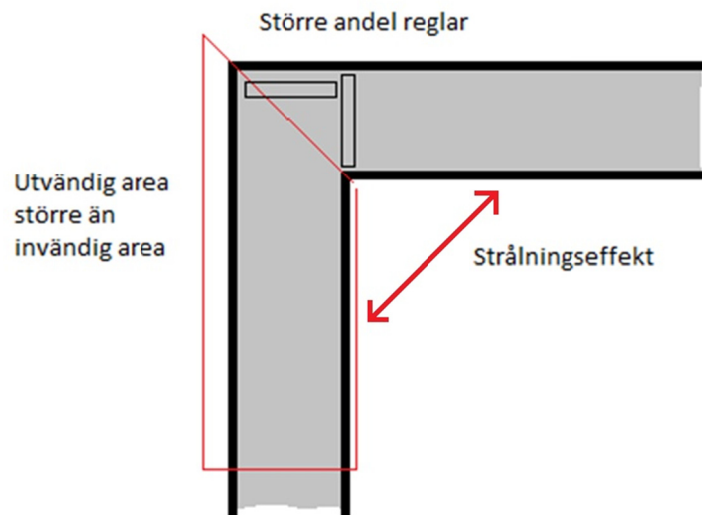
Definitionen av en köldbrygga är enligt Elmroth och Abel en konstruktionsdetalj som ger upphov till ett högre värmeflöde. De skriver: "Med köldbryggor förstås normalt en konstruktionsdetalj där ett material med dålig värmeisolering bryter genom ett material med bättre isolering" (Abel, E. & Elmroth, A., 2008). Dålig isolering är emellertid inte det enda som påverkar värmeflödet genom en detalj. Även luftflöde, strålning och det geometriska storleksförhållandet mellan kall och varm sida är betydande faktorer och beskrivs senare i kapitlet.

Köldbryggor kan anges som en andel av transmissionsförlusterna genom de inre ytorna av klimatskalet. Hur stor andel av de totala transmissionsförlusterna som köldbryggor utgör kommer däremot variera stort mellan olika objekt. Köldbryggorna är exempelvis beroende av byggnadens utformning och storlek, fönsterandel och detaljlösningar.

Den perfekta byggnaden ur ett köldbryggsperspektiv är sfärisk, med ett homogent fönster- och dörrlöst klimatskal, utan några som helst infästningar, genomföringar eller andra detaljer. En sådan byggnad har ett jämt värmeflöde genom alla ytor men att bygga och bruka en sådan byggnad är inte genomförbart, även om några idéer från denna perfekta konstruktion kanske skulle kunna tillämpas. Alla detaljer som bryter den perfekta byggnadens klimatskal är per definition köldbryggor.

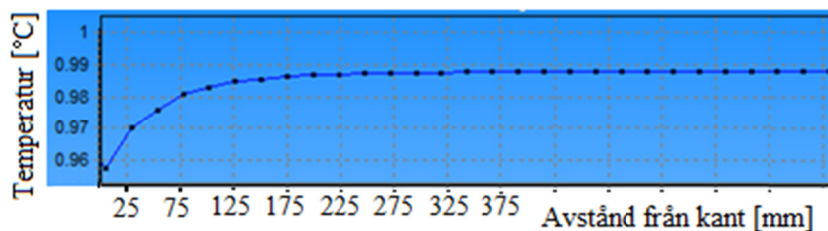
2.3.1 Faktorer som påverkar värmeflödet

Dålig isolering, strålningsinverkan, geometri samt luftflöde är faktorer som kan ge upphov till ökat värmeflöde. De tre första av dessa faktorer är direkt anknutna till designen på konstruktionen, medan luftflödet oftast kan påverkas av konstruktionsmässigt utförande. Effekten av dessa faktorer blir att sämre isolerade material som regler och pelare ökar det totala värmeflödet genom väggen. Hörnets geometriska utformning där den invändiga uppvärmda ytan är mindre än den utvändiga ger ett större värmeflöde. Fysikaliskt innebär att temperaturfallet sker från en mindre till en större yta vilket ger ökade värmeförluster, under förutsättningar att temperaturen utomhus är lägre. Den tredje märkbara effekten är en konsekvens av de andra, då väggen kyls ned kommer värmestrålningen till den kalla ytan öka och bidra till en större värmeförlust på grund av temperaturskillnaden mellan ytorna. De tre fenomenen visas i figur 2.4.



Figur 2.4- Tre faktorer som påverkar värmeflödet.

När en vägg närmar sig ett hörn eller en kant ger de tidigare nämnda faktorerna upphov till ökade värmeförluster som sänker temperaturen lokalt. I figur 2.5 illustreras denna princip, där den uppmätta temperaturen i en punkt på väggen sjunker ju närmare kanten mätningen utförs. Storleken på temperaturfallet är beroende av väggens konstruktion, men för konstruktioner med höga transmissionsförluster kan följdproblemen bli lokal påväxt av mögel, kondenserande vatten eller komfortproblem i form av kallras.



Figur 2.5 - Temperaturfördelningen när väggen närmar sig en kant.

Den sista märkbara effekten som påverkar transmissionsförlusterna genom väggen är luftflödet genom väggen då värmeflödet ökar med ökade luftrörelser i väggen. Luft i rörelse ger större värmetransport än stillastående luft, via konvektion, vilket visar på vikten att byggnader utförs lufttäta även ur ett värmetekniskt perspektiv. Lufttätheten är emellertid väldigt svår att utföra och erfarenheter har visat att ångspärrens täthet kan variera stort mellan olika byggen. I ett lågenergihus ställs krav på lufttäthet, men mätningar kan utföras först när byggnadens klimatskal är tätt och det är då svårt och dyrt att göra ändringar eller förbättringar i lufttätheten.

2.3.2 Fuktproblem och lufttäthet

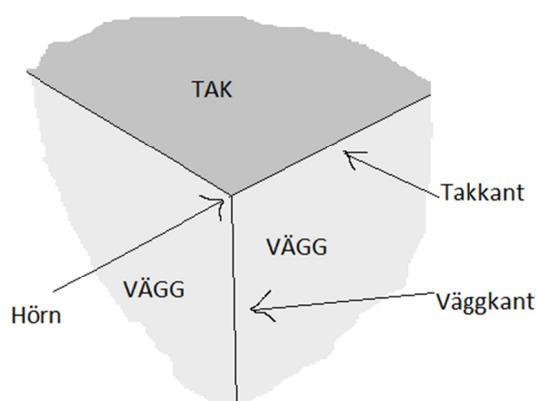
Det finns minst två orsaker till att ångspärrens täthet är betydligt viktigare i lågenergihus än i konventionella byggnader. Dels är byggnadens konstruktion känsligare mot fukt när den kalla zonen når längre in i klimatskalet och ökar risken för kondensbildning. Dels påverkas luftflödet genom otätheter och luftomsättningen ökar i en otät byggnad vilket ger ökade värmeförluster, komfortproblem och kan störa värmesystemets funktion (Abel E. & Elmroth A., 2008). Detta kan innebära att sambanden vid eventuella energiberäkningar inte stämmer. Vid temperaturmätningar och termografering på byggnader kan dessutom otätheter i klimatskalet påverka resultatet. Detta bör beaktas vid tolkning av exempelvis temperaturer på termografiska fotografier.

Erfarenheter från genomförda projekt med lågenergihus är viktig att återföra och Johansson skriver om några erfarenheter: *”Takkonstruktionerna har varierat anmärkningsvärt på en punkt, nämligen om de ska ventileras eller inte. Anledningen är att passivhusen är så väl isolerade att konstruktionen kan påverkas av fukt när mindre värme läcker genom taket. Vissa projekt har därför valt en oventilerad lösning medan andra valt en ventilerad lösning”* (Johansson, C., 2009).

2.3.3 Linje- & punktköldbryggor

En köldbrygga är att betrakta som linjeköldbrygga om den löper längs en linje där den har en konstant värmeförlust per längdenhet. En typisk detalj som definieras som en linjeköldbrygga, kallad Ψ , är den kant där två ytterväggar eller yttervägg möter anslutande, bjälklag golv eller tak. Även anslutningen mellan fönsterkarm och vägg samt dess utformning är att betrakta som en linjeköldbrygga som löper runt fönstret.

En punktköldbrygga, benämnd χ , är sådan att den förekommer punktvis i en byggnad. Exempel på dessa punktköldbryggor är detaljer som uppstår vid infästningar eller i hörnen där två ytterväggar möter anslutande bjälklag, golv eller tak. I övrigt påverkas och beräknas dessa på samma sätt som linjeköldbryggor. I figur 2.6 illustreras hörn, kant, tak och vägg, där kanterna är att betrakta som linjeköldbryggor och hörnet som en punktköldbrygga.



Figur 2.6 – Definition av hörn och kanter.

2.3.4 Installationer inverkan på transmissionsförluster

Med installationer menas exempelvis rördragningar, aggregat, styr- och reglerutrustning eller don, som i flerbostadshus är till för att ombesörja inomhusklimatet och öka komforten för de boende genom ett jämnare och behagligare klimat. Installationer kan påverka mängden köldbryggor i en byggnad, som när ett rör eller ett don bryter en yttervägg. Problemet är större för byggnader där det finns klimatkyla, exempelvis i skolor och kontorsbyggnader. I dessa byggnader är fönsterarean oftast så stor att klimatkyla behövs för att kompensera för större värmetillskott orsakat av solinstrålningen och internlast. I passivhus hålls fönsterarean oftast mindre och inverkan av solinstrålningen blir därmed mindre vilket gör att färre installationer behövs och de som finns placeras oftast innanför klimatskalet.

Även en omvänd situation kan uppstå, där köldbryggorna påverkar installationerna. Det kan exempelvis handla om sensorer som placerats i en kall punkt på en vägg eller under ett fönster men är avsedd att mäta rumstemperaturen och kan på så sätt ge fel styrningar till aggregaten. Att placera sådan utrustning fel innebär ofta onödigt stora värmeförluster eller extrema temperaturer, som i värsta fall kan orsaka skada på material.

2.4 Olika metoder för köldbryggsberäkningar

I skrivande stund finns det flera metoder och hjälpmedel för beräkning av värmeflöden och köldbryggor. Några av de metoder som används på marknaden presenteras i tabell 2.2. Vissa av programmen innehåller möjligheten att få fram en fullständig energiberäkning, där köldbryggorna beräknas och mängdas automatiskt efter de förutsättningar som matas in i programmet.

Tabell 2.2 – Metoder för beräkning av köldbryggor.

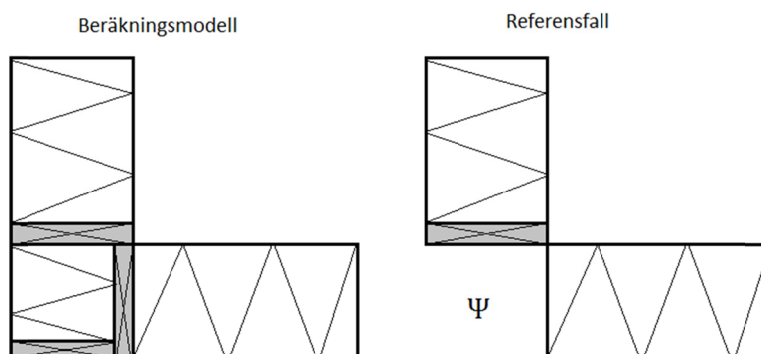
Metod	Kommentar
Enorm	Värden för köldbryggor kan anges manuellt eller beräknas i programmet.
VIP-Energy	Inbyggd metod för uppskattning av köldbryggor.
Isolerguiden	Beskriver metoder för att göra en beräkning av individuella köldbryggor, empiriskt framtagna.
Swedisol	Handberäkningsmetoder.
Paroc	Modellering av detaljer i 2D, värmeflöden.
HEAT2	Modellering av detaljer i 3D, värmeflöden.
HEAT3	Anges med en ”slidebar” som varierande andel av UA.
IDA	Varierande värden
Schablonvärden	Beräkningsmetoder för; värmeflöden och yttemperaturer.
ISO-10211:2007	Beräkningsmetoder för: värmeöverföring via marken.
ISO-13370:2007	

Valet av beräkningsmetoder ger troligen stor variation i resultaten och det hade varit effektivt om en standard kunde föreskrivas. Det finns flera standarder att följa och materialtillverkarna har ofta egna program eller beräkningsmetoder för att ta fram transmissionsförluster. Rockwools program RocTec använder som exempel den europeiska standarden ISO 12241:1998 (Rockwool, 2011) för beräkning av värmeförluster medan Isovers beräkningsprogram använder sig av BBR12 (Isover, 2012). Programmen och standarderna är oftast dyra vilket gör att dessa inte alltid finns tillgängliga hos projektörerna.

2.4.1 Swedisols beräkningsmetod

Swedisol är ett företag som tillverkar isolering och de har tagit fram en beräkningsmetod för olika fall av köldbryggor. Med hjälp av simuleringar i datorprogram har värmeflöden beräknats genom olika delar och ett matematiskt samband har kunnat tas fram för olika köldbryggsdetaljer. Dessa empiriskt framtagna ekvationer kan sedan användas för att beräkna värden för olika köldbryggor enligt Swedisols principer.

Köldbryggan beräknas som differensen mellan värmeflödet genom detaljens hela konstruktionsdel, benämns beräkningsmodell och värmeflödet genom köldbryggans intilliggande delar, benämns referensfall, se figur 2.7. Differensen i värmeflöde ger värdet för köldbryggan, se ekvation 2.1.



Figur 2.7 - Exempel på beräkningsmodell och referensfall.

$$\Psi_{\text{linjeköldbrygga}} = q_{\text{beräkningsmodell}} - q_{\text{referensfall}} \quad (\text{ekv. 2.1})$$

2.5 BBR – Boverkets byggregler

Boverket är en av de svenska myndigheter som ställer krav på hur stora värmeförlusterna får vara i svenska byggnader. För att få jämförbara resultat i beräkningarna finns regelverk med olika förutsättningar beroende på byggnadens geografiska placering eller byggnadstyp. De för denna rapport relevanta regler och krav som Boverket ställer beskrivs nedan och används som grund för definitionerna av lågenergihus.

2.5.1 Klimatzoner & energikrav

Då hänsyn till variationer i utetemperatur tas kan byggnader projekteras efter olika krav beroende på geografisk placering. Exempelvis ställs inte samma krav på energieffektivitet på en byggnad placerad i Skåne som i Norrland, då effektbehovet är större vid större temperaturdifferens mellan inom och utomhusklimatet. Även om en byggnad behöver mer energi till uppvärmning på grund av större temperaturdifferenser så bör köldbryggorna behandlas på samma sätt oavsett var byggnaden är placerad. De svenska temperaturerna utomhus varierar mycket mellan olika delar av landet och BBR delar in Sverige i tre klimatzoner. Detta innebär att energikravet för uppvärmning varierar mellan Sveriges olika klimatzoner från 90 i söder till 130 kWh/m² och år i norr för hus utan uppvärmning med direktverkande el.

Klimatzon I	Norrbottnens, Västerbottens och Jämtlands län.
Klimatzon II	Västernorrlands, Gävleborgs, Dalarnas och Värmlands län.
Klimatzon III	Västra Götalands, Jönköpings, Kronobergs, Kalmar, Östergötlands, Södermanlands, Örebro, Västmanlands, Stockholms, Uppsala, Skåne, Hallands, Blekinge och Gotlands län.

(Boverket, 2011b)

2.5.2 Genomsnittligt U-värde

För att beräkna värmeförlusten för en byggnad är en av de ingående posterna i beräkningen byggnadens transmissionsförluster genom klimatskalet. BBR ställer därmed krav om hur stort det genomsnittliga U-värdet för byggnaden får vara. Notera att kravet inte är formulerat så att specifika byggnadsdelar måste uppnå ett visst värde. På så sätt kan konstruktören välja att använda en sämre byggnadsdel men ändå klara kravet genom extra isolering på andra delar eller en detalj med obruten isolering för att reducera köldbryggor. Formeln för genomsnittligt U-värde anges i ekvation 2.2 nedan:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \sum_{k=1}^m l_k \cdot \Psi_k + \sum_{j=1}^p X_j}{A_{om}} \quad (\text{ekv. 2.2})$$

U_m	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient för byggnadsdelar och köldbryggor. [W/(m ² ·K)]
U_i	Värmegenomgångskoefficient för byggnadsdel i. [W/(m ² ·K)]
A_i	Area för byggnadsdel i:s yta mot uppvärmd inneluft. För fönster, dörrar, portar och dylikt beräknas A_i med karmyttermått. [m ²]
l_k	Längden mot uppvärmd inneluft av den linjära köldbryggan k. [m]
Ψ_k	Värmegenomgångskoefficient för den linjära köldbryggan k. [W/(m·K)]
X_j	Värmegenomgångskoefficienten för den punktformiga köldbryggan j. [W/K]
A_{om}	Sammanlagd area för omslutande byggnadsdelars ytor mot uppvärmd inneluft. Med omslutande byggnadsdelar avses sådana byggnadsdelar som begränsar uppvärmda delar av bostäder eller lokaler mot det fria, mot mark eller mot delvis uppvärmda utrymmen. [m ²]

(Boverket, 2011a)

2.6 Kravspecifikation – Lågenergihus

Ett lågenergihus kan definieras på olika sätt med de olika normer och standarder som satts upp. Till kategorin lågenergihus räknas bland annat passivhus, minienergihus, nära nollenergihus, nollenergihus och plusenergihus. Bland dessa är passivhusen troligen de mest etablerade på marknaden och begreppet har blivit vedertaget bland tillverkare och kunder. I denna rapport är det passivhusen som är intressanta och de objekt som undersöks faller under denna kategori.

2.6.1 Svensk passivhuscertifiering – FEBY

Grundidén med passivhus är att byggnaden skall vara så välisolerad att internvärmerna som produceras skall stå för en stor del av uppvärmningsbehovet. Genom väl isolerade klimatskal med små köldbryggor, återvunnen värme från frånluft och

avlopp, snålspolande armatur, effektivare varmvattenberedare och individuell varmvattenförbrukning kan uppvärmningsbehovet minskas. Det är tänkt att de ökade investeringskostnader för dessa lösningar skall betala tillbaka sig under brukartiden genom lägre brukarkostnader. En bonuseffekt av bättre isolering och färre köldbryggor är även ökad komfort inomhus bland annat genom jämnare rumstemperaturer och mindre kallras. Med god utnyttjning av solen kan gratisenergi fås genom fönster och solfångare (Forum för energieffektivt byggande, 2011a).

Passivhus definieras enligt Passivhusstandarden som Forum för Energieffektivt Byggande, FEBY, tagit fram men som Sveriges Centrum för Nollenergihus, SCNH, övertagit från och med år 2012 (Forum för energieffektivt byggande, 2011a). Denna standard varierar mellan länder och bestäms av de nationella Passivhuscentrumen. Specifikationen är även uppdelad i krav och råd, där kraven måste uppfyllas medan råden bör uppfyllas för att få kallas passivhus.

2.6.1.1 FEBY 09

Den svenska standarden för passivhus, FEBY 09, utkom år 2009 och beskriver hur en byggnad skall projekteras för att märkas som passivhus. För att beräkna effektbehovet för en byggnad enligt FEBY 09 används ekvation 2.3:

$$P_{byggnad} = \left(\left(\sum(U_j \cdot A_j) + \sum(l_k \cdot \Psi_k) + (q_{läck} + q_{vent}(1 - v))\rho \cdot c \right) \cdot (20 - DUT_{20}) + \sum(U_{mark} \cdot A_{mark}) \cdot (20 - T_{mark}) - P_{intern} \right) / A_{temp} \quad (\text{ekv. 2.3})$$

$\sum(U_j \cdot A_j)$	Summan av transmissionsförluster med hänsyn till invändiga ytan, A_j , mot uppvärmd luft, dock exklusive $U_{mark} \cdot A_{mark}$. [W/K]
$\sum(U_{mark} \cdot A_{mark})$	Summan av transmissionsförluster med hänsyn till invändiga ytan mot mark, A_{mark} , och markens temperatur, T_{mark} , mot uppvärmd luft. [W/K]
$\sum(l_k \cdot \Psi_k)$	Värmeeffektörluster p.g.a. linjeköldbryggor. [W/K]
$\rho \cdot c \cdot q_{läck}$	Värmeeffektörluster p.g.a. luftläckning, $q_{läck}$ [l/s], luftens densitet, ρ , och värmekapacitet, c .
$\rho \cdot c \cdot q_{vent}(1 - v) \cdot d$	Värmeeffektörluster p.g.a. ventilation med hänsyn till systemets verkningsgrad, v , densitet, ρ , värmekapacitet, c , och relativ drifttid, d . [W/K]
T_{mark}	Marktemperaturen, bestäms enligt bilaga 2 i FEBY 09.
P_{intern}	Intern spillvärme, se specificering FEBY 09 s9 för olika byggnadstyper.

(Forum för energieffektivt byggande, 2011a)

2.6.1.2 FEBY 12

Till den nya versionen på Passivhusstandard, som utkom år 2012, har många förändringar gjorts och beräkningsgången förändrats nästan helt. En anledning till förändringarna är att standarden skall följa SVEBY, för att förenkla arbetet med olika beräkningsprogram som använder sig av denna. De nya kraven är utformade så att det inte skall vara svårare att uppfylla dessa än de tidigare.

Utetemperaturen har ändrats från dimensionerande utetemperatur, DUT, till dimensionerande vinterutetemperatur, DVUT. Båda dessa kommer i sin tur från BBR. När det gäller fönster så har kraven ökat, från tidigare U-värde på 0,9 till 0,8 W/(m²·K). Notera även att punktköldbryggor skall beräknas enligt BBR i FEBY 12 medan de inte behandlas i FEBY 09. För att beräkna värmeförlusttalet, VFT, för en byggnad enligt FEBY 12 används ekvation 2.4:

$$VFT_{DVUT} = H_T \cdot (21 - DVUT) / A_{temp} \quad (\text{ekv. 2.4})$$

VFT Värmeförlusttalet beräknas som summan av byggnadens värmeförluster via transmission, ventilation och infiltration (luftläckning via klimatskärm). [W/m², A_{temp}]

$$H_T = \sum U_m \cdot A_{omsl} + \rho \cdot c \cdot q_{läck} + \rho \cdot c \cdot d \cdot q_{vent} (1 - v) \quad (\text{ekv. 2.5})$$

U_m Klimatskärmens genomsnittliga U-värde, se kapitel 2.4.2.

H_T Byggnadens värmeförlustkoefficient. [W/K]

A_{omsl} Klimatskärmens omslutande area, mätt invändigt. [m²]

(Forum för energieffektivt byggande, 2012)

2.6.1.3 Byggnadstyper vid beräkning

För att utföra effektbehovsberäkningar enligt FEBY krävs det att byggnadstypen är känd. Byggnader delas in i fyra olika alternativ:

Lätt byggnad	Lätt konstruktion och krypgrund.
Halvlätt byggnad	Lätt konstruktion, betongplatta på mark.
Halvtung byggnad	Tung konstruktion, bjälklag av betong lätta utfackningsväggar.
Tung byggnad	Tung konstruktion, ej specificerat.

Klassificeringen används för att bestämma en tidskonstant vilken härrör från hur snabbt en byggnads innertemperatur förändras vid en hastig förändring i utetemperatur. Detta beror på att en tung byggnad lagrar värme bättre än en lätt byggnad. Tidskonstanten bestäms dock olika i FEBY 09 och FEBY 12 men den används för att ta hänsyn till samma sak i de båda standarderna. I FEBY 09 är

standardvärdena 80, 150 eller 200 timmar för lätt, halvlätt respektive halvtung medan den i FEBY 12 är 3, 6 eller 12 dygn. Tung konstruktion ger samma värde som halvtung, med andra ord 12 dygn (Forum för energieffektivt byggande, 2009a och 2012).

2.6.1.4 Effektkrav enligt FEBY

Standarder och krav förändras med tiden och för att en jämförelse mellan projekt som projekterats vid olika tillfällen skall kunna göras behövs oftast förtydligande av kraven som ställts. De effektkrav som ställs på byggnader enligt FEBY 09 och FEBY 12 formuleras olika, men skall vara lika rimliga att uppfylla enligt utgivaren, se sammanfattning i tabell 2.3 (Forum för energieffektivt byggande, 2009a och 2012).

Tabell 2.3 – Effektkrav från FEBY09 och FEBY12.

Klimatzon	P _{byggnad}	
	[W/m ² , A _{temp}] ¹	VFT [W/m ² , A _{temp}] ²
I	12	17
II	11	16
III	10	15

¹Tillägg för byggnader mindre än 200 m²: + 2 W/m², A_{temp}

²Tillägg för byggnader mindre än 400 m²: + 2 W/m², A_{temp}

Notera att värmeförlusttalet i FEBY 12 är större än effektbehovet i FEBY 09. Kraven skall dock vara motsvarande enligt utgivaren och det är ekvationen som har gjorts om. Tillägg på effektkravet för små byggnader har i FEBY 12 utökats till att omfatta byggnader upp till 400 m², A_{temp}.

2.6.2 Verifieringsprocessen för passivhus

Det finns olika nivåer av passivhusmärkning, varav verifiering av passivhus är en. För att kalla sin byggnad för ett verifierat passivhus krävs att mätningar och kontroller utförs. Det finns ett dokument, "verifieringsprocessen", utgivet av SCNH som beskriver i detalj hur detta skall gå till, men i korthet går processen ut på följande sätt; Vid projekteringen görs en ansökan efter att kraven uppfyllts som vid godkännande innebär att byggnaden är certifierad. Efter byggskedet kan sedan en tredjepartskontroll göras för att verifiera att byggnaden nått upp till kraven. Först vid godkännande av denna kontroll blir byggnaden ett verifierat passivhus, annars blir byggnaden inte verifierad men behåller sin certifiering (Forum för energieffektivt byggande, 2009b).

I FEBY12 finns det även en ny indelning av passivhus. Där det tidigare fanns certifierat- och verifierat- ”för passivhus enligt FEBY” finns det nu även "projekterat för passivhus". "Certifierat för passivhus" betyder nu att projektet är granskat av Sveriges Centrum för Nollenergihus. "Projekterat för passivhus" betyder att det uppfyller kraven enligt beräkningar och "verifierat för passivhus" betyder att byggnaden uppfyller kraven enligt mätningar. Detta betyder att det nya "projekterat

för passivhus" har tagit över det som tidigare var "certifierat för passivhus" som i sin tur har fått helt ny mening.

2.6.3 Internationella krav

Passivhusstandarden är framtagen för internationellt bruk men de flesta nationer behöver modifiera nyckeltal för att byggnaderna skall fungera väl i det egna klimatet. Det svenska klimatet och de svenska byggreglerna lämpar sig inte för en direkt tillämpning då temperaturvariationerna mellan norr och söder gör att samma energikrav inte rimligtvis kan ställas i hela landet.

Beräkningen av köldbryggor sker annorlunda enligt den tyska än den svenska beräkningsmetoden (PEP, 2012). I den svenska beräknas den omslutande arean som de invändiga ytor som angränsar mot byggnadens klimatskal, medan den tyska standarden räknar utvändigt yta. Detta gör att UA blir olika beroende på beräkningsmetod och därmed lämpar sig inte en generell procentsats för beräkning av köldbryggor. En annan tydlig skillnad mellan den tyska och svenska standarden för passivhus är att det maximala luftflödet inte begränsas i den svenska. Istället är kraven att luftflödet skall vara tillräckligt för att uppnå hälsokraven, men inte större än att effektbehovet överskrids.

Värmeflödet genom linjeköldbryggor bör begränsas och organisationer som europeiska PEP, Promotion of European Passive houses (PEP, 2012) eller amerikanska PHUIS sätter kravet till $\Psi = 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ för linjeköldbryggor (PHIUS, 2012). Både FEBY och BBR anger att linjeköldbryggor skall beräknas i effektbehovsekvationen, men ställer inga specifika krav på dessa. Notera att dessa krav är satta vid beräkning med utvändigt UA.

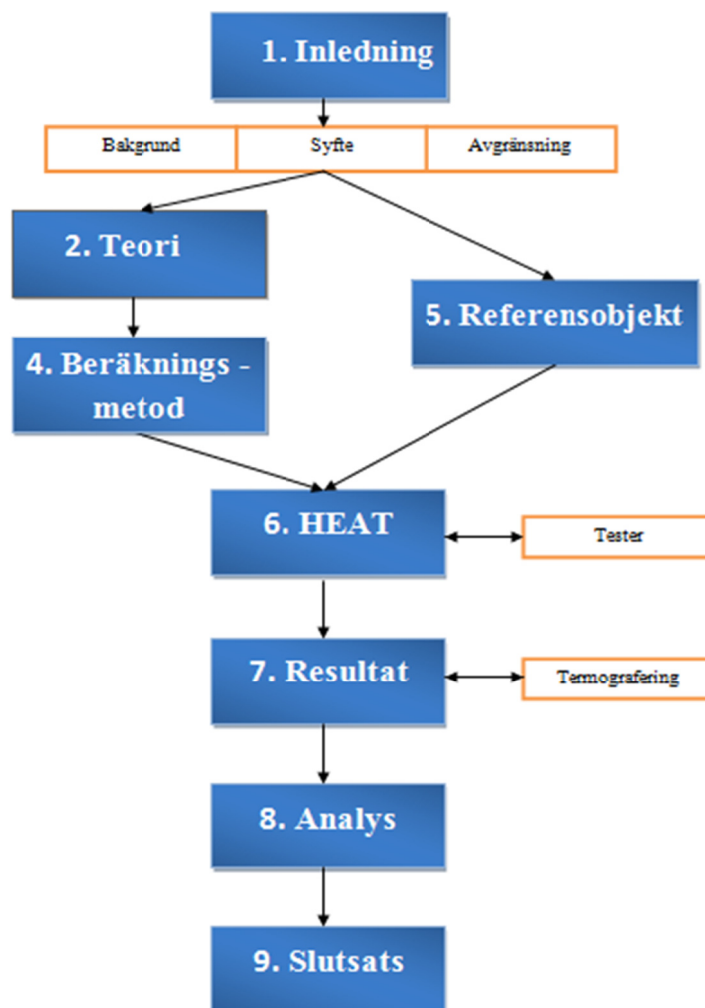
Cepheus är ett annat europeiskt samarbete om passivhus, med ursprung i Tyskland. Likhetererna med det svenska systemet är ganska stora, exempelvis ställs krav på att fönster skall vara effektiva, om max $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ i U-värde. För linjeköldbryggor gäller maxvärde om $\Psi = 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, beräknat för utvändigt UA och solvärme bör kompensera för 40 % av de totala värmeförlusterna i en byggnad (Cepheus, 2012).

3. Struktur & metod

Rapportens struktur presenteras nedan för att underlätta förståelsen för arbetsgången. Även metoden som utgör grunden för rapporten beskrivs i kapitlet.

3.1 Rapportstruktur

I rapporten har författarnas syn på tillgänglig kunskap om köldbryggor presenterats i inledningskapitlet. Några relevanta teorier diskuteras sedan för att därefter motivera valet av beräkningsmetoder. I detta kapitel beskrivs rapportens metod. Vidare beskrivs tre referensobjekt som tillsammans med beräkningsmetoden utgör grunden för HEAT-beräkningarna. Efter erhållet resultat analyseras inverkan av olika parametrar som även ger underlag till diskussionskapitlet. Som en sista del av rapporten diskuteras resultaten för att komma fram till en slutsats. I figur 3.1 nedan presenteras rapportens uppbyggnad med kapitelnummer för att visualisera arbetsgången.



Figur 3.1 - Illustration över rapportstruktur.

3.2 Metod

Tre referensobjekt väljs från de av NCC färdigställda projekt som är klassade som passivhus vilka sedan utgör underlag till rapportens beräkningar. Dessa objekt väljs så att de skiljer sig till konstruktionsmetod men erbjuder tillräckligt med underlag för att detaljerade modeller skall kunna göras.

Värmeflödesberäkningar utförs på de olika modellerna med programmet HEAT. Först testas olika metoder för beräkning av köldbryggor för att undersöka på vilket sätt modellerna bäst anpassas mot teorier och vilka faktorer som påverkar resultatet. De köldbryggor från referensobjekten som anses relevanta för denna rapport modelleras sedan i HEAT enligt de slutsatser som dragits vid de tidigare testerna. Varje modell utförs minst två gånger för att minska risken för felinställningar i programmet eller missar i modelleringen.

Resultatet presenteras som andelar och faktiska värden för respektive referensobjekt i resultatkapitlet. Transmissionsförluster för olika detaljer sammanställs som nyckeltal för olika konstruktionslösningar. Utöver de tester som utförts i HEAT görs även en termografering på ett av referensobjekten för att se hur väl de teoretiska resultaten stämmer med verkligheten.

Analyser av hur olika faktorer påverkar köldbryggors transmissionsegenskaper samt hur utformningen av byggnader påverkar andelen köldbryggor utförs. Dessa analyser kan även visa på osäkerheter i beräkningar, som ger underlag till diskussionen.

4. Beräkningsmetoder

I detta kapitel redovisas först vilka köldbryggor som beräknas i denna rapport och hur dessa beräkningar skall utföras. Förklaringen börjar allmänt avseende linje- och punktköldbryggor för att sedan förklara de enskilda köldbryggorna mer detaljerat. Därefter redovisas beräkningsmetoden för att beräkna andelen köldbryggor och alla steg fram till resultatet. Sist förklaras hur FEBY:s beräkningar används i denna rapport. I kapitel 7: Resultat redovisas sedan de resultat som erhålls från beräkningsmetoderna i detta kapitel.

4.1 Beräkning av köldbryggor

Det mest korrekta sättet att betrakta en köldbrygga på är som differensen mellan konstruktionen med köldbrygga och konstruktionen utan köldbrygga. Vad som betraktas som en köldbrygga varierar dock beroende på vilken detalj det handlar om, var den är placerad samt hur man beräknat transmissionsförlusterna genom de omgivande ytorna. I denna rapport beräknas transmissionsförlusterna genom klimatskalet med avseende på klimatskalets invändiga yta, vilket följer BBR:s krav. Detta medför att en andel av de yttre ytorna av klimatskalet inte bidrar till några transmissionsförluster i beräkningarna om inte hänsyn tas till köldbryggorna. Därför finns risken att transmissionsförlusterna underskattas med denna beräkningsmetod vilket motiverar beräkning av köldbryggor.

Då byggnader ser olika ut är det lämpligt att generalisera de vanligast förekommande köldbryggorna. Detta för att begränsa arbetsbördan och för att göra jämförelser mellan byggnader möjliga. En lista med vad som i denna rapport anses vara de vanligaste köldbryggorna spaltas upp och delas in i kategorierna linje- och punktköldbryggor:

Linjeköldbryggor

- Kant i golv, bjälklag, tak och vägg.
- Fönster- och dörranslutningar.
- Balkonginfästningar.
- Innerväggar som bryter klimatskal.

Punktköldbryggor

- Hörn i golv, bjälklag och tak.
- Utmärkande bultar, genomföringar och infästningar.

4.1.1 Beräkning av linje- & punktköldbryggor

Det allmänna sättet att betrakta linjeköldbryggor i denna rapport är genom en beräkning av differensen mellan en konstruktionsdel med köldbrygga, *beräkningsmodell*, och en konstruktionsdel utan köldbrygga, *referensfall*, se ekvation 4.1:

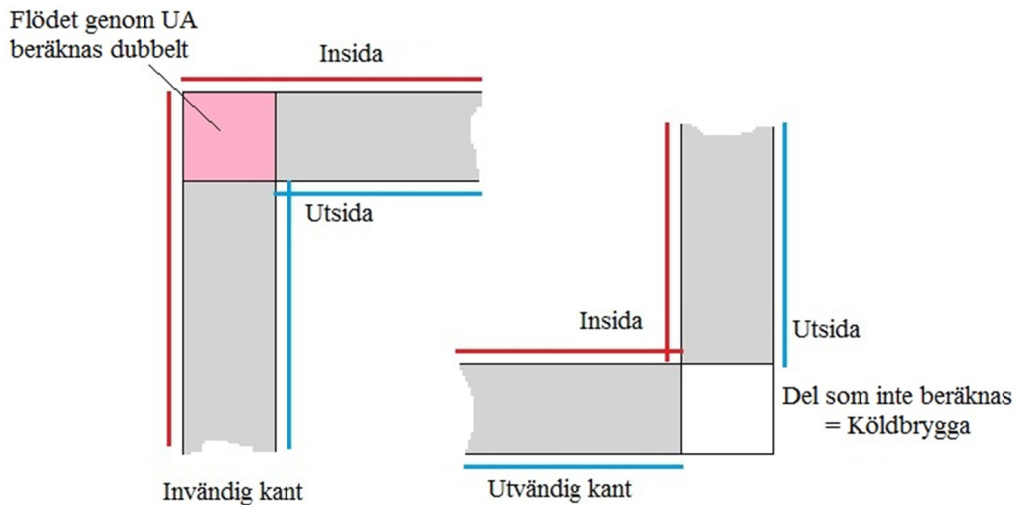
$$\Psi_{\text{linjeköldbrygga}} = q_{\text{beräkningsmodell}} - q_{\text{referensfall}} \quad (\text{ekv. 4.1})$$

Samma teori och beräkningsgång som används för linjeköldbryggor gäller även för punktköldbryggor i denna rapport, se ekvation 4.2:

$$\chi_{\text{punktköldbrygga}} = q_{\text{beräkningsmodell}} - q_{\text{referensfall}} \quad (\text{ekv. 4.2})$$

4.1.2 Inre kanter & hörn

I alla byggnader finns utvändiga hörn och kanter i klimatskalet, men där konstruktionen ibland avviker från en traditionell rektangulär byggnad kan även invändiga kanter och hörn finnas i klimatskalet, se figur 4.1. De kanter som är att betrakta som inre har större invändig area på omgivande ytor än på utvändiga ytor. Fysikaliskt innebär detta att den geometriska faktorn inte inverkar negativt på värmeflödet vid en inre kant, då den invändiga arean är större.



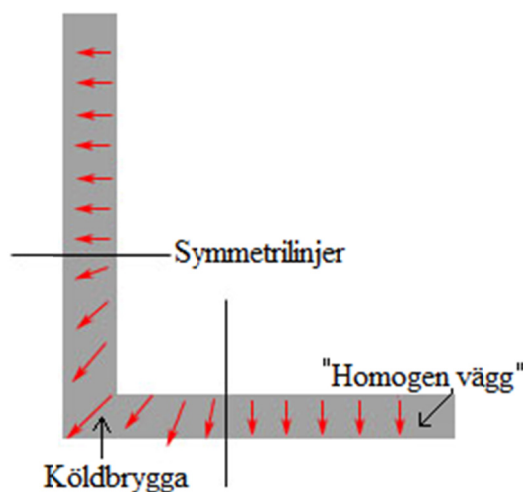
Figur 4.1 - Utvändig och invändig kant.

Med bakgrund av detta beräknas inte inre kanter i denna rapport. En kontroll av värmeflödet genom inre kanter utförs i kapitel 6: HEAT för att undersöka effekten av geometri samt extra regler och motivera antagandet att inte beräkna inre kanter.

Inre hörn påverkas på samma sätt, där de omgivande kanterna räknas dubbelt i hörnpunkten. Samma resultat som används för kanten anses kunna tillämpas på de inre hörnen, därför beräknas inte heller dessa till andelen köldbryggor.

4.1.3 Symmetrilinjer för värmeflöden

När det finns köldbryggor i en homogen konstruktion påverkas värmeflödet genom konstruktionen och ett ökat värmeflöde leds genom den mindre isolerade delen. I konstruktionsdetaljer finns därför en linje i vilket värmeflödet går från att endast transporteras rakt från den varma till den kalla sidan utan inverkan av en köldbrygga till att påverkas i andra riktningar. Denna linje kallas symmetrilinje och principen visas i figur 4.2.



Figur 4.2 - Princip för symmetrilinjer.

I teorin är influensen av köldbryggan inte linjärt avtagande och det är svårt att bestämma en exakt position för linjen i konstruktionen. Istället bör linjen väljas sådan att influensen påverkar försumbart mycket och underlättar modelleringen av konstruktionen.

Rent praktiskt innebär detta att man antingen kan testa sig fram och jämföra resultaten för att på så sätt se ungefär var symmetrilinjen finns. Ett annat alternativ är att alltid sätta den på ett sådant avstånd att man vet att det är god säkerhetsmarginal till var den bör vara. Detta leder dock till att en mycket större konstruktion måste modelleras vilket i sin tur ökar på tiden det tar att genomföra beräkningar. En för stor modell påverkar även cellindelningen i programmet, som presenteras i kapitel 6: HEAT, och reducerar noggrannheten i beräkningen. För att bestämma vilket avstånd till symmetrilinjen som skall användas undersöks olika modeller i kapitel 6: HEAT.

I standarden SSEN ISO 10211:2007 anges att symmetrilinjer skall vara det största värdet av tre gånger tjockleken på den modellerade detaljen och en meter (Nyberg, H., 2011). För en vägg med tjockleken 300 mm innebär detta exempelvis att symmetrilinjen sätts till en meter.

4.1.4 Övergångsmotstånd vid ytor

Normalt antas ett övergångsmotstånd för luft nära ytor, där R_{si} betecknar motståndet vid ytterväggens insida, R_{tak} insida tak, R_{golv} insida golv och R_{se} utvändigt motstånd för alla ytor. Värdet för dessa presenteras i tabell 4.1 nedan. Nära hörn och kant blir detta motstånd något större på grund av mindre luftcirkulation, men avvikelsen försummas i denna rapport. Vid beräkning av ventilerad luftspalt har fasadskiktet i väggen försumrats, men övergångsmotståndet ökats för att motsvara de minskade luftcirkulationer liknande de nära en vägg inomhus (Abel, E. & Elmroth, A., 2008).

Tabell 4.1 – Sammanställning av övergångsmotstånd.

Motstånd	Förklaring	Värde [(m ² ·K)/W]
R_{si}	Invändig vertikal yta	0,13
R_{tak}	Invändigt tak	0,10
R_{golv}	Invändigt golv	0,15
R_{se}	Utvändig yta	0,04
$R_{vent.luftspalt}$	Ventilerad luftspalt	0,13

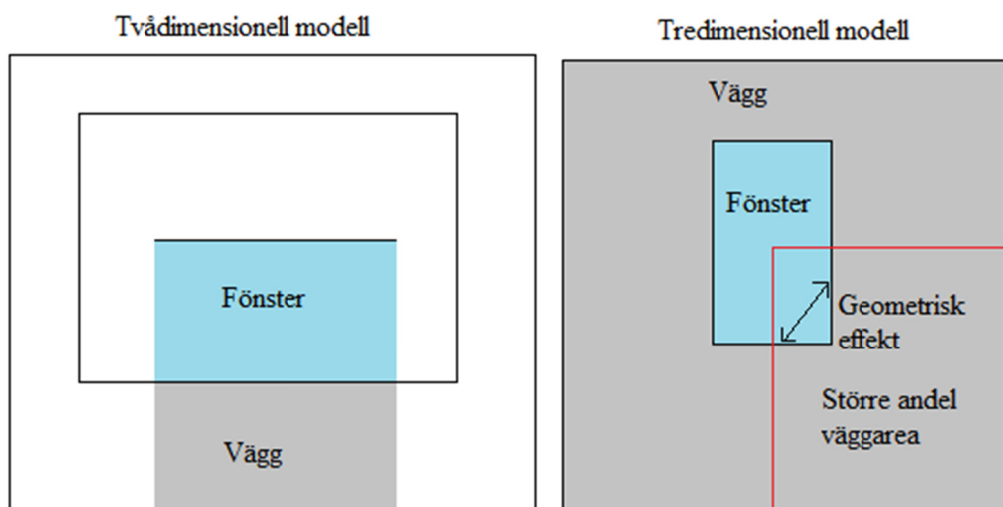
4.2 Beräkningsmodeller för köldbryggor

De detaljer som valts ut skall beräknas för att kunna utvärderas. Dessa beräkningar utförs med hjälp av beräkningsprogrammen HEAT2 och HEAT3, se kapitel 6: HEAT. Varje köldbrygga kontrolleras minst en gång för att säkerställa att inställningar och indata är rätt. Ett urval av de många köldbryggor som beräknas med programmen redovisas i kapitel 7: Resultat och samtliga beräknade värden går att återfinna i kapitel 11: Bilaga - Beräkningar.

4.2.1 Fönster- & dörranslutningar

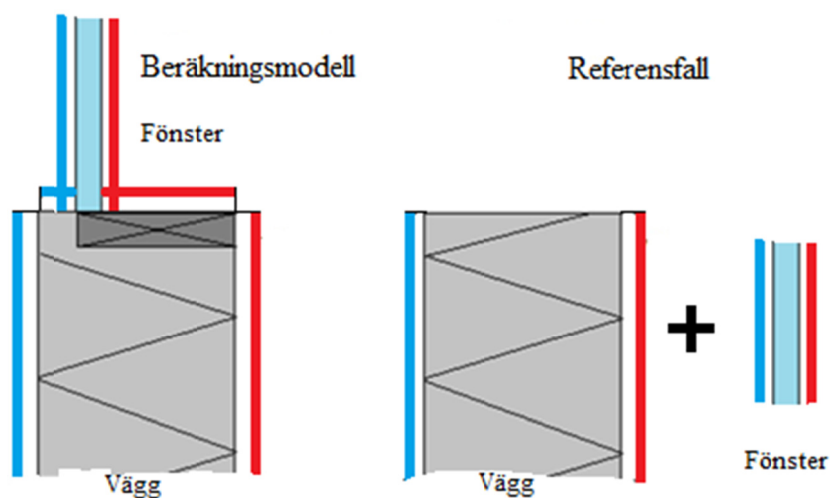
Att beräkna köldbryggan i fönster- och dörranslutningar är komplicerat jämfört med andra köldbryggor. Beräkningar för fönster- och dörranslutningar utförs på samma sätt men nedan redovisas enbart beräkningsgången för fönsteranslutningar. För att kunna beräkna denna bör, förutom själva fönstret, även avstånd till andra fönster tas med i modellen. Detta för att veta det verkliga avståndet till symmetrilinjer. I denna rapport förenklas dock beräkningen genom att avståndet till andra fönster bortses ifrån.

På grund av fönsterkarm och extra regler vid fönsterhålet uppstår geometriska och konstruktionsmässiga faktorer som inverkar på de värmeledande egenskaperna. Dessa måste beaktas vid beräkning av köldbryggan i fönster- och dörranslutning. Om en tvådimensionell modell tillämpas tas inte hänsyn till alla de effekter som uppstår vid fönstrets hörn. Dessa kan förklaras som den mindre andelen fönsterglas i förhållande till vägg per löpmeter köldbrygga och hörnets geometriska effekt i planet, se figur 4.3.



Figur 4.3 – Fönster i 2D respektive 3D.

Tvådimensionellt beräknas fönstrets köldbrygga enligt samma princip som övriga köldbryggor, se figur 4.4 och ekvation 4.3, men där det i referensfaller ingår två värmeflöden. Det är värmeflödena genom vägg och fönster vilka beräknas separat och sedan summeras till värmeflödet för referensfallet.



Figur 4.4 - Princip för extra värmeflöde genom fönsteranslutning i två dimensioner.

$$\Psi_{\text{fönster}} = q_{\text{beräkningsmodell}} - q_{\text{referensfall}} \quad (\text{ekv. 4.3})$$

Istället för att räkna nollflöde genom glaset och försumma den geometriska faktorn av glaset kan en bättre anpassning göras i HEAT3. Med HEAT modellen kan köldbryggan kring fönstret beräknas enligt ekvation 4.4:

$$\Psi_{\text{fönster}} = q_{\text{fönster \& vägg}} - q_{\text{fönster}} - q_{\text{vägg}} \quad (\text{ekv. 4.4})$$

$$q_{\text{fönster}} = U_{\text{fönster}} \cdot A_{\text{fönster}} \quad (\text{ekv. 4.5})$$

Först beräknas värmeflödet genom hela konstruktionen för att ta fram beräkningsmodellen. Sedan beräknas värmeflödet separat genom fönster och vägg som $U_{fönster} \cdot A_{fönster}$ respektive $U_{vägg} \cdot A_{vägg}$ eller $q_{vägg}$. Linjeköldbryggan för hela fönstret kan sedan tas fram som skillnaden mellan beräkningsmodellen och komponenternas värmeflöden. Köldbryggan per meter beräknas genom division med fönstrets omkrets.

Ett fönster kan delas upp i två delar med separata U-värden, karm och glas. Detta är dock en förenkling då U-värdet varierar något inom både karm och glas. Fönstertillverkare anger vanligtvis U-värdet, $U_{fönster}$, för hela konstruktionen, alltså ett sammanvägt värde mellan U-värdet för fönsterkarm och glas samt variationer över dessa. Genom att känna till utformningen på fönstret i andel glas och karm samt $U_{fönster}$ och U_{glas} kan ekvation 4.6 nedan användas för att ta fram ett ungefärligt U-värdet på fönsterkarmen. U_{glas} måste antas för att kunna beräkna U_{karm} .

$$U_{fönster} = \frac{A_{karm} \cdot U_{karm} + A_{glas} \cdot U_{glas}}{A_{fönster}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (\text{ekv. 4.6})$$

När fönstertillverkare anger ett U-värde för sina produkter representerar detta hela fönstrets summerade värmegenomgångsmotstånd. Detta innebär att övergångsmotstånd för in- och utsida, karmens samt glasets värmegenomgångsmotstånd är sammanräknade till ett värde. Detta samband presenteras i ekvation 4.7 nedan.

$$U_i = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_{si} + R_i + R_{se}} \quad [(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}] \quad (\text{ekv. 4.7})$$

$$U_i = \frac{\lambda_i}{d_i} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (\text{ekv. 4.8})$$

Med U-värden för glas och karmdel kan värmemotståndet i fönstrets olika delar beräknas med ekvation 4.9. Hänsyn tas till övergångsmotstånd, ty U-värdet representerar alla värmemotstånd i fönsterkonstruktionen.

$$R_i = \frac{1 - (R_{si} + R_{se}) \cdot U_i}{U_i} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \quad (\text{ekv. 4.9})$$

Med ett beräknat R-värde och en antagen tjocklek d kan nu ett λ -värde för respektive del i fönsterkonstruktionen beräknas med ekvation 4.10. Tjocklek och λ -värde används i HEAT modelleringen för att ta fram värmeflödet genom konstruktionen.

$$\lambda_i = R_i \cdot d_i \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (\text{ekv. 4.10})$$

Med det omräknade värmeflödet, λ och tjockleken, d i HEAT-modellen kan köldbryggan i fönsteranslutningen beräknas enligt ekvation 4.11 och 4.12 nedan. Värmeflödet genom fönstret kan sedan dras bort från värmeflödet genom den totala konstruktionen. Linje köldbryggan per meter kan sen beräknas utifrån Ψ -värdet, som

i HEAT3 fallet divideras med den omslutande längden för karmens yttermått i modellen, enligt ekvation 4.12:

$$\Psi_{fönsterheat2} = q_{ber} - q_{glas} - q_{karm} - q_{vägg} - q_{drev} \text{ [W/(m·K)]} \quad (\text{ekv. 4.11})$$

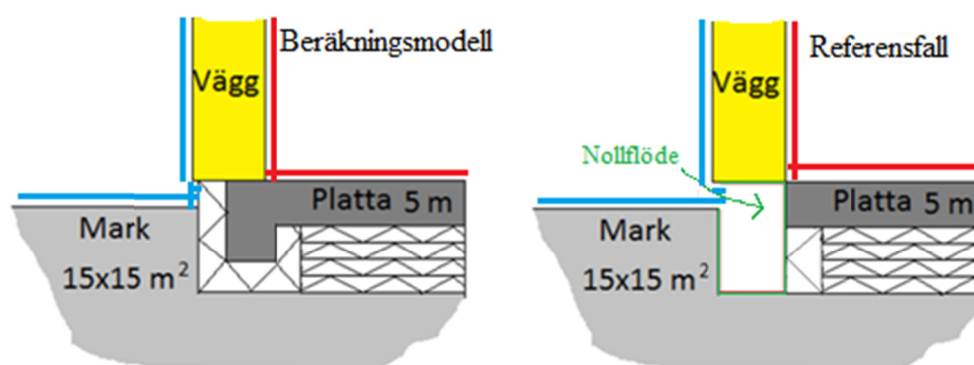
$$\Psi_{fönsterheat3} = \frac{q_{ber} - q_{fönster} - q_{vägg} - q_{drev}}{l_{omsl.}} \text{ [W/(m·K)]} \quad (\text{ekv. 4.12})$$

Köldbryggan runt dörrar och fönster skiljer sig från varandra, dels för att dörren sällan är uppdelad i glas och karm, dels för att formfaktorn inverkar på köldbryggan. I analyserna som görs anses dock dörrarna, vilka främst utgörs av glasade balkongdörrar, vara tillräckligt lika fönster för att kunna uppskattas med samma värmeförlust per meter som för fönsteranslutningar.

4.2.2 Kanter

Yttre kanter modelleras och beräknas enligt ekvation 4.1, då detta anses ge de mest korrekta värdena på köldbryggan. Nedan redovisas varje köldbrygga i kantanslutningar för att tydliggöra vad som definieras i dessa och hur de beräknas.

Kantbalk: Det som i denna rapport definieras som den linjeköldbryggan i kantbalken är den del av grundplattan som finns under ytterväggen vilket visas i figur 4.5. För att beräkna denna köldbrygga sätts nollflöde genom kantbalkens alla gränslinjer i referensfallet. Plattans symmetrilinje sätts till fem meter från kanten, som antas vara mitten på ett medelstort hus. För HEAT-beräkningar rekommenderas sedan att marken skall sträcka sig tre gånger plattans symmetribredd i djup och längd, vilket i HEAT2 blir 15x15 m². I HEAT3 skall även bredden vara 15 m. För att beräkna denna köldbrygga används den generella ekvationen 4.1 för linjeköldbryggor. Inverkan av intilliggande byggnader försummas och avstånd mellan mark och fasad bestäms av ritningarnas dimensioner.

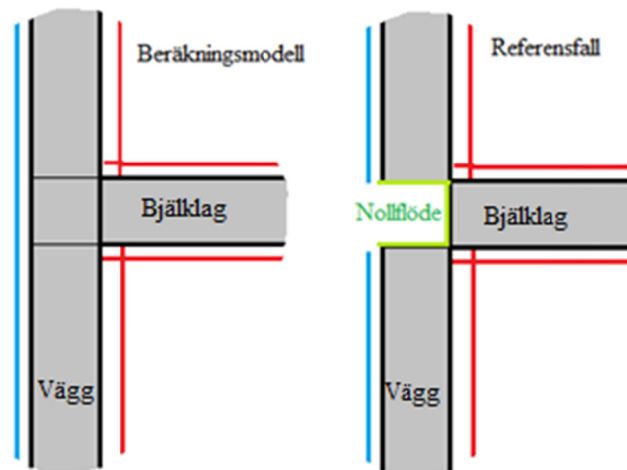


Figur 4.5 - Beräkningsmodell och referensfall för kantbalk.

Notera att i de fall där kantbalken sträcker sig innanför väggens inre linje ”förlängs” isoleringen så att denna når fram till nollflödeskanten och på så sätt skapar en homogen golvkonstruktion. Detta då den extra betongen i kantbalken är att betrakta som en del av köldbryggan. I ett examensarbete om köldbryggor i

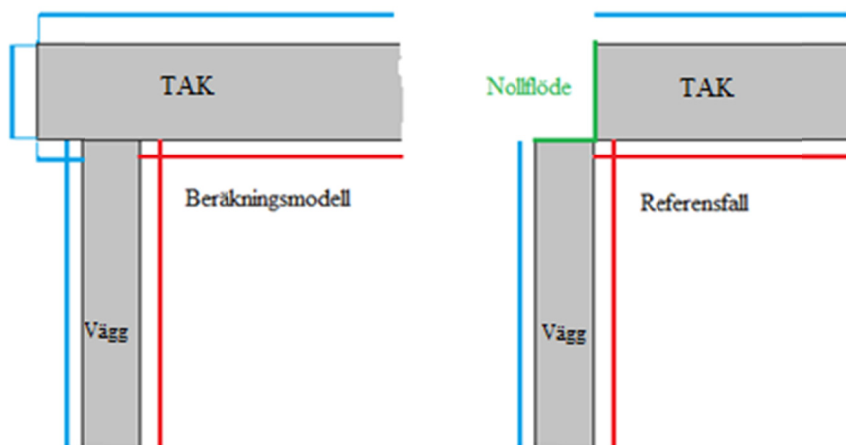
grundkonstruktioner, *Thermal bridges at foundations*, beskrivs detta som det bästa tillvägagångssättet för att få ett så korrekt resultat som möjligt (Nyberg, H., 2011).

Bjälklag: Linjeköldbryggan i bjälklagskanten består av både kanten i taket från våningen under samt kanten vid golvet i våningen över, se figur 4.6. Dessa tillsammans är vad i denna rapport kallas bjälklagskant. Denna anslutning är nästan alltid sämre isolerad än övriga väggen vilket ger en ökad transmissionsförlust. För att beräkna denna köldbrygga används den generella ekvationen 4.1 för linjeköldbryggor.



Figur 4.6 - Beräkningsmodell och referensfall för bjälklag.

Tak: Köldbryggan för takkant definieras som den del av taket som är över ytterväggen och gäller bara yttertaket, inte eventuella inre tak från bjälklag då dessa är beräknade i bjälklagskantens köldbrygga, se figur 4.7. För att beräkna denna köldbrygga används den generella ekvationen 4.1 för linjeköldbryggor.



Figur 4.7 - Beräkningsmodell och referensfall för takkant.

Väggar: Vägkant är den kant som uppstår när två ytterväggar möts. I denna rapport beräknas de yttre väggkanterna enligt ekvation 4.1, se stycket om yttre och inre kant. Inre väggar beräknas endast om de bryter klimatskalet och på så sätt ger upphov till ökat värmeflöde. Ekvationen för denna beräkning är samma som för ytterväggskanter.

4.2.3 Hörn

Hörn modelleras i HEAT3 för att ta hänsyn till geometrin och beräknas på enklaste sätt med den generella ekvationen 4.2 för punktköldbryggor. Nedan redovisas varje köldbrygga i hörnanslutningar för att tydliggöra vad som definieras i dessa och hur de beräknas.

Tak och kantbalkshörn: Hörn i anslutningen mellan yttervägg och tak i väggkanter kallas takhörn och beräknas enligt ekvation 4.2 för punktköldbryggor. Hörn i anslutningen mellan golvet och väggen kallas kantbalkshörn.

Bjälklagshörn: Bjälklagshörn är de hörn som uppstår där ytterväggen möter ett mellanbjälklag och det är viktigt att notera att det finns ett hörn under och ett hörn över bjälklaget. Vid beräkning av köldbrygga i bjälklagshörnet summeras dessa vilket innebär att beräkningsmodellen och referensfallet tar hänsyn till effekten av båda hörnen. Om beräkning för separata våningsplan hade gjorts kan denna metod inte användas och värmeflödet kan vara olika vid det övre och det undre hörnet.

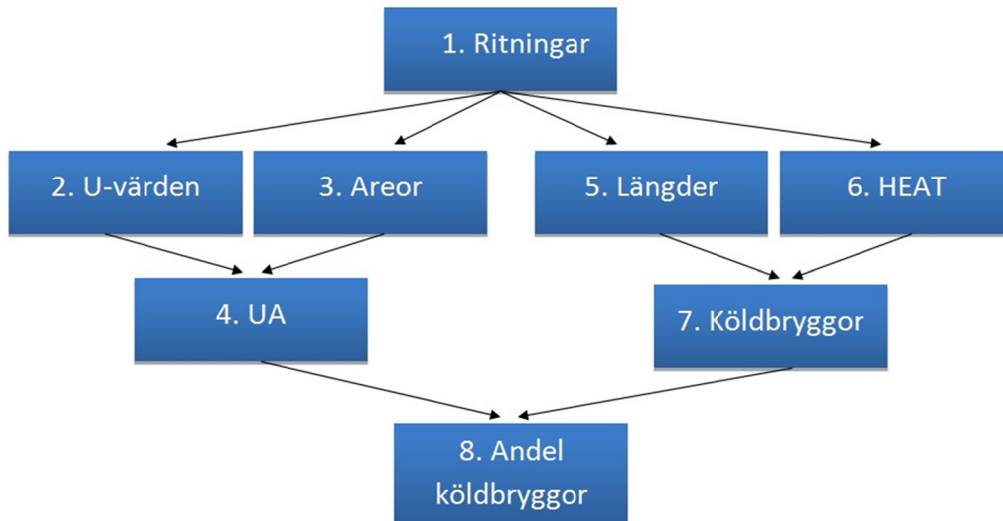
Fönster- och dörrhörn: Då fönster- och dörranslutningar modelleras i HEAT3 tas hänsyn till de hörn som finns längs anslutningen. Dessa hörn ingår i beräkningen för linjeköldbryggor för fönster- och dörranslutning och kommer därför inte redovisas separat i denna rapport.

4.2.4 Övriga detaljer

De enda övriga detaljer som anses bidra till andelen köldbryggor i en byggnad är anslutningen till balkonger. Denna beräknas inte i denna rapport men finns medräknad till andelen köldbryggor i Beckomberga men då med ett värmeflöde beräknat av tillverkaren Halfen.

4.3 Beräkningsmetod – Andel köldbryggor

I figur 4.8 presenteras metodiken och i stycket nedan beskrivs beräkningsgången för beräkning av UA, köldbryggor och andelen köldbryggor. Vid beräkning av byggnadens totala effektbehov tas U-värden för väggar, tak, grund och fönster fram. Andelen köldbryggor avser det procentuella påslaget på transmissionsförluster genom klimatskalet som utgörs av värmeflöden genom köldbryggor, se ekvation 4.13.



Figur 4.8 - Beräkningsmetod för andel köldbryggor.

Beräkningsmetoden i denna rapport går till enligt följande:

1. Från NCCs ritningar och underlag fås konstruktionsdelarna uppbyggnad, vilka mått de har samt U-värden för respektive del.
2. U-värden finns framräknade i ritningar vilka sammanställs.
3. Med hjälp av måtten från ritningarna beräknas areor för de olika ytorna i klimatskalet.
4. Dessa beräknade areor kombinerat med U-värden för motsvarande del ger värmetransmissionen genom klimatskalet, kallad UA.
5. Ritningarna används för att ta fram de längder och antal köldbryggor som finns i byggnaden.
6. Ritningarna används även till att göra modeller i HEAT för att beräkna respektive köldbrygga.
7. Längder och antal kombinerat med transmissionsförlusten från respektive köldbrygga ger den totala värmetransmissionen genom köldbryggorna.
8. Andelen köldbryggor beräknas genom att dividera den totala värmetransmissionen genom köldbryggor med den totala värmetransmissionen genom UA.

$$\text{Andel köldbryggor av UA} = \frac{\text{Köldbryggor}}{\text{UA}} \quad (\text{ekv. 4.13})$$

4.3.1 Beräkning av UA

För att beräkna UA multipliceras de invändiga areorna var för sig med byggnadsdelens U-värde och summeras sedan till ett totalt UA värde för hela byggnaden. Normalt ingår byggnadsdelarna golv, väggar, tak, fönster och dörrar i UA. I denna rapport används i huvudsak mått och U-värden som erhålls från energiberäkningar gjorda av NCC när beräkning av UA görs. I de fall där inga ytor är angivna utförs mätningar på ritningar och i de fall ritningar inte finns tillgängliga utförs uppskattningar av areor.

4.4 Förutsättningar för beräkning av VFT

Beräkning av VFT utförs enligt ekvation 2.4, kapitel 2: Litteraturstudie & teori, med de specifika värden på köldbryggor och transmissionsförluster för varje referensobjekt som beräknas i kapitel 7: Resultat. Utöver dessa beror VFT på en mängd varierande värden. För att göra en jämförelse mellan referensobjekten sätts de parametrar som beror på byggnadens konstruktionsmässiga utförande ($q_{läck}$), installationer (FTX) och den geografiska placeringen (DVUT) till fasta värden. Andra parametrar kan variera, såsom byggnadens tidskonstant eller andelen fönster, då dessa parametrar är knutna till systemtypen.

- A_{omsl} , U_m , A_{temp} , $DVUT$: varierar för objekten
- FTX: 85 %
- $q_{läck}=0,3 \text{ l/m}^2, A_{om}$
- $q_{vent}=0,35 \text{ l/m}^2, A_{temp}$

Byggnadsspecifika parametrar presenteras i kapitel 5: Referensobjekt, medan återvinningsgraden på FTX-systemet sätts till 85 % för alla referensobjekten. Värden för $q_{läck}$ anges efter det krav som ställs för att uppnå passivhusdefinitionen och q_{vent} sätts till BBRs krav på ventilationsflöde.

5. Referensobjekt

I detta kapitel redovisas de referensobjekt som undersöks i denna rapport. Först förklaras vilka kriterier som ligger till grund för valen och därefter redovisas själva referensobjekten och vilka konstruktioner som använts i dessa.

5.1 Underlag & kriterier för urval

För att effektivisera byggprocessen har NCC valt att ta fram standardplattformar med typritningar för hur konstruktioner bör se ut för olika byggnadstyper. En av dessa standardplattformar behandlar flerbostadshus i lågenergiutförande och består av lösningar för byggnadsdelar som grund, väggar och tak, men även för detaljer som fönster och anslutningar.

Ett brett underlag av referensobjekt gör att fler variationer av köldbryggor beräknas. Därför väljs tre olika sorters passivhus ut med olika antal våningar och stomsystem för att på så sätt se hur andelen köldbryggor varierar med utformningen av en byggnad. Utifrån dessa kriterier valdes projekten Beckomberga, Björka och Portvakten ut, som är tre olika stomsystem i olika våningsantal. Utöver dessa undersöks även området Vallda Heberg, som i huvudsak består av småhus. I Vallda Heberg har förändringar gjorts för att reducera värmeflödet genom kantbalken, vilket gör denna till en intressant detalj att studera. De relevanta projekten sammanfattas i tabell 5.1 men beskrivs mer ingående i nästa stycke.

Tabell 5.1 – Sammanställning av referensobjekt.

Projekt	Boendetyper	Stomme	Storlek	DVUT [°C]
Beckomberga	Flerbostadshus, 4 plan	Halvtung	5 hus, tot. 59 lgh.	-7,9
Björka	Radhus, 2 plan	Halvtung	6 hus, tot. 36 lgh	-7,9
Portvakten	Flerbostadshus, 8 plan	Halvlätt	2 hus, tot. 64 lgh	-9,4
Vallda Heberg	Småhus, 2 plan	Halvlätt	Enfamiljsbostäder	-

5.2 Beckomberga

Projektet Beckomberga är ett flerbostadshusområde i Stockholmsregionen och består av fem hus med totalt 59 lägenheter. Projektet är dessutom Stockholms första flerbostadshus som är ett certifierat passivhus (Johansson, C., 2009). Byggnaderna i detta område är projekterade utifrån typritningar för lågenergihus och visas i figur 5.1. Det finns en genomförd utvärdering kring energieffektiviteten i byggnaderna i Beckomberga i form av ett examensarbete, "*Flerbostadshus med plusenergiteknik*", där möjligheterna att uppgradera husen till plusenergihus undersökts. Slutsatsen blev dock att det är för dyrt att producera el med enbart lokal elkraft, vilket är ett av kraven för plusenergihus (Asimakidis, C. & Högberg, R., 2010).



Figur 5.1 - Beckomberga med smala fönster och justerbar solavskärmning kring balkongerna.

Byggnadsutformning

Bjälklag & vägg: Då Beckomberga använder sig av typritningarna för lågenergihus är bjälklaget en betongkonstruktion som ansluter till klimatskal av stålreglar och isolering. Den totala väggjockleken blir drygt 300 mm med tre isolerande lager om 70+195+70 mm. I konstruktionen finns inga innerväggar som bryter klimatskalet.

Kantbalk & golv: Grundkonstruktionen består av en platta på mark med anslutande stålpelarkonstruktion för stommen. Kantbalken är isolerad med 70 mm cellplast i yttersta skiktet. Golvet består av platta på mark med 300 mm isolering och 240 mm betong.

Tak: Taket är ett ventilerat sadeltak med låg lutning och är isolerat med 500 mm mineralull men smalnar av mot takfoten.

Övrigt: Balkonger är infästa med balkongelement som antas vara av fabrikat Halfen. Den vanligast förekommande fönstertypen i Beckomberga är ett fönster med utvändiga måtten 1640x890 mm². Fönstret är smalt och högt i förhållande till de övriga referensfönster som används i denna rapport och har ett totalt U-värde på 0,9 (m²·K)/W. Glasdelen i fönstret antas ha ett U-värde på 0,6 W/(m²·K). I beräkningarna ”förenklas” byggnadens form på så sätt att konstruktionen ser lika ut i alla plan. Detta innebär att antalet ytterkanter och takhörn blir åtta och antalet innerkanter blir fyra.

5.3 Björka

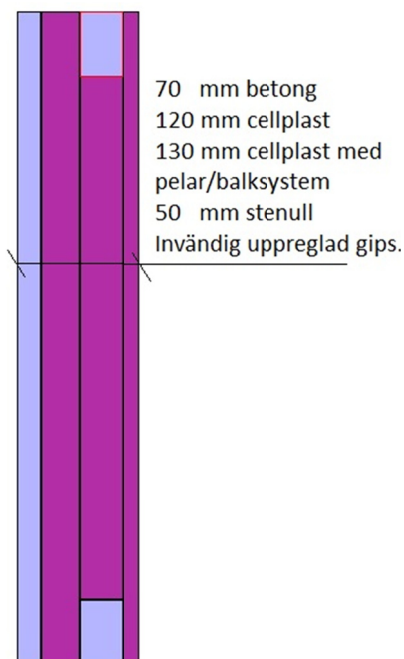
Passivhusen i området Björka i Helsingborg är ett flerbostadsområde med 36 lägenheter. Byggnaderna är tvåvånings radhus uppförda i prefabricerad betong med en stomme av den så kallade Klimatväggen från Finja AB vilken beskrivs mer ingående nedan. I området finns två typer av byggnader, benämnda hustyp A och B. Båda hustyper är i två plan med Finjas klimatväggssystem. Hustyp A har separata lägenheter på plan ett och två, medan hustyp B har lägenheter som sträcker sig över båda planen. I figur 5.2 visas lägenhetstyp A. På en av huskropparnas tak finns dessutom en solfångaranläggning.



Figur 5.2 - Björka hustyp A, med sin glasade entré och fristående balkongkonstruktion. Foto: Danebjer, Ekström, 2012.

Byggnadsutformning

Bjälklag & vägg: I Björka används Finjas Klimatvägg vilken är en prefabricerad vägg med 70 mm betong och 250 mm isolering i tvärsnittet. Längs kanterna går en betongram med en tjocklek på 130 mm som tillsammans med pelare med c/c avstånd 1350 mm bildar den bärande delen i konstruktionen. Det anslutande betongbjälklaget monteras sedan på betongramens övre balk och sträcker sig in i väggen till skarven mellan det inre och det yttre isolerskiktet, se figur 5.3. I konstruktionen bryter de lägenhetsskiljande väggar en del av klimatskalet vilket gör att dessa beräknas till det totala antalet köldbryggor.



Figur 5.3 - Principuppgbyggnad av Finjas Klimatvägg.

Kantbalk & golv: Kantbalken i Björka består av anslutningen mellan en platta på mark och Finjas Klimatvägg. Kantbalken har 150 mm isolering i det yttersta skiktet och golvet består av 350 mm isolering och 100 mm betong.

Tak: Taket i Björka är ett uppreglat tak med 500 mm lösull som ansluter och vilar mot ytterväggselementet.

Övrigt: Balkonger är helt fristående på pelarsystem och anses inte bidra till transmissionsförlusterna. I Björka väljs ett fönster med dimensionen 1385x1385 mm² att representera samtliga fönster i konstruktionen. Fönstret har ett U-värde på 0,9 (m²·K)/W. Glasdelen i fönstret antas ha ett U-värde på 0,6 W/(m²·K).

5.4 Portvakten

Portvakten är två passivhus om vardera åtta våningar uppförda i trästomme, med bottenvåning i betong, uppförda i Växjö. Balkongerna är upphängda i stag längst fasaden, vilket ger få anslutningspunkter till stommen och därmed en begränsad köldbrygga. I figur 5.4 illustreras de båda massivträhusen. I varje lägenhet finns ett batteri för eftervärmning av ventilationsluften och taken är vinklade för att underlätta framtida montage av solfångare.



*Figur 5.4 - Portvakten med sina utanpåliggande balkonger.
Notera bottenplanet i betong och sadeltaket som är vinklat för
solfångarmontage.*

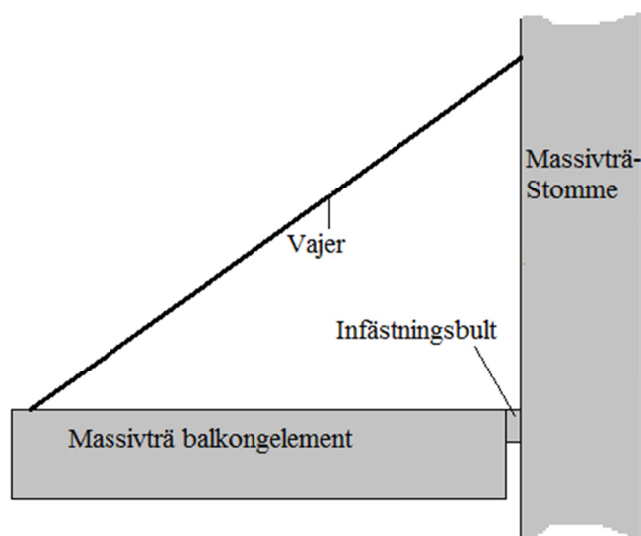
Byggnadsutformning

Bjälklag & vägg: Portvakten är ett annorlunda projekt där massivträelement utgör stommen. Väggarna är uppbyggda så att innanför luftspalten finns två skikt med 170+170 mm isolering, en massivträstomme om 82 mm samt 45 mm träreglar med isolering. Bjälklagen skruvas fast i väggstommen och det nedersta planet väggarna är av 180 mm platsgjuten betong med 120+195 mm isolering.

Kantbalk & golv: Kantbalken är en betongkonstruktion i anslutningen mellan vägg och platta som förstärks undertill med en sula för att ta upp tryckkrafterna. Denna sula har måtten 1000x300 mm² och är isolerad med 100 mm cellplast runt omkring. Golvet består av platta på mark med 300 mm isolering och 100 mm betong.

Tak: Översta våningen i Portvakten är kombinerat sadeltak med maskinrum och genomsnittstjockleken på isoleringen är 500 mm.

Övrigt: Balkonger är infästa i stommen via vajrar, se figur 5.5. I Portvakten har fönster från NorDan använts och det vanligaste måttet på ett fönster är 1288x988mm², med ett U-värde på 1,0 W/(m²·K). Glasdelen i fönstret antas ha ett U-värde på 0,7 W/(m²·K). Köldbryggan längs fönsterinfästningen är sedan tidigare noggrant beräknad till 0,045 W/(m·K) i examensarbetet "Utvecklingen för passivhus i Sverige" (Fredlund, S. & Ranevi, C., 2010). Detta värde på köldbryggan används till beräkningarna i denna rapport.



Figur 5.5 - Princip för balkongupphängning Portvakten.

5.5 Sammanställning av mått

Nedan sammanställs de relevanta egenskaperna för referensobjekten, såsom längder på köldbryggor, areor för de delar som ingår i klimatskalet med motsvarande U-värden, för referensobjekten i tabell 5.1 och 5.2. Värden erhålls i första hand från projektunderlag i energiberäkningar och i andra hand från ritningar.

Tabell 5.1 – Sammanställning av längder på linjeköldbryggor samt antal punktköldbryggor på referensobjekten.

Detaljer	Beckomberga	Björka	Portvakten
Linjeköldbryggor	Längder	Längder	Längder
	[m]	[m]	[m]
Fönster & dörrar	600	188 & 26,4	750 & 208,5
Kantbalk	73,9	54	72
Takkant	73,9	54	72
Bjälklag	295,4	54	504
Väggkant & mellanv.	80	20 & 7	80
Balkonger	75	-	-
Punktköldbryggor	Antal	Antal	Antal
Takhörn	8	4	4
Kantbalkshörn	8	4	4
Bjälklagshörn	24	4	28

Tabell 5.2 – Sammanställning av areor och U-värden på referensobjekten.

Detaljer	Beckomberga		Björka		Portvakten	
	Areor [m ²]	U-värde [W/(m ² ·K)]	Areor [m ²]	U-värde [W/(m ² ·K)]	Areor [m ²]	U-värde [W/(m ² ·K)]
Fönster & dörr	150,0	0,9	51	0,9	333	1,0
Tak	351,3	0,07	146	0,07	332	0,075
Golv	362,2	0,13	146	0,09	332	0,097
Vägg	698,3	0,09	260	0,139	1161	0,126

5.6 Typritningar

NCC:s typritningar är framtagna för att standardisera projekt och effektivisera byggprocessen. Typritningarna finns för olika sorters plattformar, mest relevant för denna rapport är lågenergiplattformarna. Dessa finns i två utförande, flerbostadshus som exemplifieras av Beckomberga och småhus som projektet Vallda Heberg tillhör.

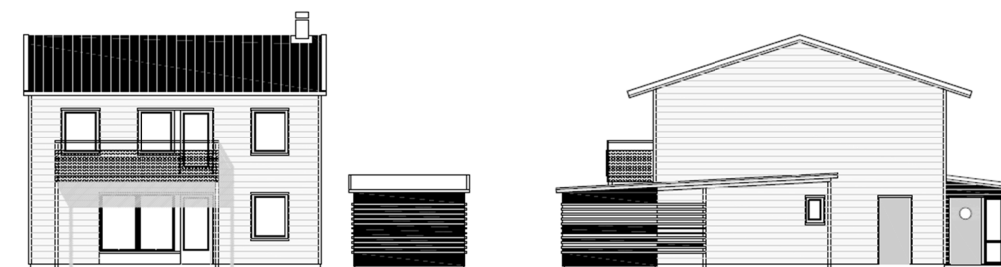
En annan plattform är den för flerbostadshus i standardutförande, som inte används i lågenergihus. Tidigare beräknade värden från plattformen används för att göra en jämförelse mellan köldbryggor i standard och lågenergiutförande senare i rapporten.

Konstruktionen i typritningarna är ett stomsystem i stål och betong, med uppreglade utfackningsväggar. Fasaden finns i tre utförande, som murad, putsad och träpanel. Oavsett fasadtyp finns det tre standardiserade väggjockelekar som ger tre olika U-värden för respektive fasadtyp. För att underlätta montage varieras ett av isoleringsskikten i väggen för att ge respektive U-värde.

5.7 Vallda Heberg

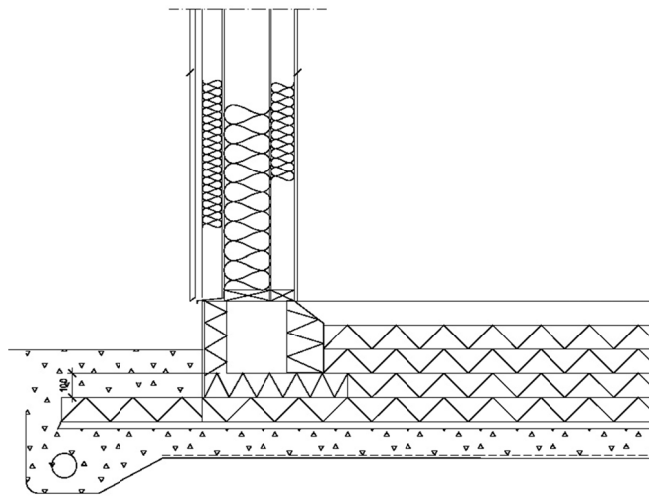
Området Vallda Heberg är ett projekt innehållandes bostadshus och äldreboende beläget i Göteborgsområdet. I takt med att nya kravspecifikationer lanserats för passivhus har arbetet med förbättring av köldbryggor fortsatt. I Vallda Heberg har man bland annat förbättrat köldbryggan vid kantbalken och på så sätt reducerat värmeflödet genom denna.

Även om Vallda är ett projekt som till största del omfattar småhus, tillämpas samma principer för konstruktionen som för flerbostadshus. Plattformen för småhus ser ut på ett liknande sätt som plattformen för flerbostadshus. Byggnaderna i Vallda Heberg är i huvudsak småhus i kvadratisk utförande i två våningar, se figur 5.6.



Figur 5.6 - Småhus i Vallda Hedberg, från ritningsunderlag.

För att visa på de förbättringar som kan göras avseende energiflöden undersöks även kantbalken. Denna konstruktion skiljer sig från de traditionella kantbalkskonstruktionerna som används i de andra referensobjekten. Ett extra skikt isolering placeras mellan kantbalken och plattan för att reducera värmeflödet, se figur 5.7.



Figur 5.7 - Kantbalk Vallda Heberg, från ritningsunderlag.

Det som är viktigt att tänka på i den här typen av konstruktion är att temperaturen i kantbalken kan bli låg och orsaka kondensbildning vid syllen. När kantbalken blir mer välisolerad reduceras värmeflödet utåt vilket sänker temperaturen i hela konstruktionen. Detta kan leda till låga temperaturer i kantbalken, vilket kan orsaka kondensbildning av den fuktigare inomhusluften.

6. HEAT

I detta kapitel förklaras först programmen HEAT2 och HEAT3 samt några funktioner ur dessa. Därefter utförs tester på programparametrar som kan varieras samt hur modellerna i HEAT skall utföras för att ge mest korrekt resultat. Vilka förutsättningar som gäller för de specifika beräkningarna redovisas sist. Resultaten av beräkningarna redovisas i kapitel 7: Resultat.

6.1 Programmet HEAT

HEAT2 och HEAT3 är datorprogram som kan användas för att beräkna temperaturfördelning, yttemperaturer och värmeflöden i olika modeller. Båda programmen har möjlighet att genomföra stationära beräkningar såväl som beräkningar med varierande temperatur och värmelagring i material. För denna rapport är jämförelsen mellan olika köldbryggor och dess värmeflöde per temperaturgradient det intressanta, vilket gör stationära värmeflödesberäkningar till den lämpligaste metoden.

Skillnaden mellan de båda programmen är främst att HEAT3 klarar av att beräkna tredimensionella modeller av objekt, som exempelvis hörn eller fönster. Däremot är HEAT2 mycket enklare att arbeta i och bör ge samma resultat som HEAT3 för tvådimensionella beräkningar. Beräkningsjämförelser mellan programmen utförs senare i kapitlet. I denna rapport kontrolleras inte HEAT som program, även om ett antal parameterkontroller utförs. I denna rapport används HEAT2 version 8.03 och HEAT3 version 6.02.

6.1.1 Cellindelning

Vid beräkningarna i HEAT delas modellerna upp i flera rutor för vilka värmeflöde och temperatur beräknas separat. Dessa rutor kallas celler och indelningen av dessa kan göras i olika upplösning, en inställning som kan utföras automatiskt av programmet. Om man då ökar storleken på modellen kommer cellerna spridas ut och ge ett mindre korrekt resultat, då antalet celler är förutbestämt. Det finns en funktion för koncentrerat av antalet celler till valfri punkt om modellen främst fokuserar på värmeflödet kring denna punkt. Detta är en lämplig funktion för de stora tredimensionella beräkningarna som annars tar lång tid att genomföra, men där noggrannheten endast är intressant kring själva köldbryggan.

Antalet celler för en figur varierar, men maxantalet anges som antal celler i bredaste riktningen och är 2000 stycken för HEAT2 samt 130 stycken för HEAT3. I huvudsak används maxantalet celler i beräkningarna i denna rapport, men för stora konstruktioner som t.ex. markhörn, har lägre värden använts för att reducera beräkningstiden. En test av cellindelningens inverkan utförs senare i kapitlet.

6.1.2 Empty box

I HEAT3 finns en funktion kallad "empty box" som är ett mycket användbart verktyg för köldbryggsberäkningar. I praktiken kan en volym tas bort i modellen med detta verktyg och en *referensmodell* kan enkelt skapas ur en *beräkningsmodell* genom att infoga "empty box" där köldbryggan är. Detta innebär en stor tidsbesparing då modeller i HEAT3 tar mycket tid att utföra.

6.2 HEAT – Programparametrar

Några lämpliga tester av programparametrar i HEAT genomförs för att undersöka programmets egenskaper. Med dessa tester går det att bestämma det bästa utförandet vilket ger de mest representativa resultaten på HEAT-beräkningarna. De undersökningar som anses lämpliga att genomföra är:

- Jämförelse mellan HEAT2 & HEAT3
- Avstånd till symmetrilinjer
- Inverkan av cellindelning
- Jämförelse mellan helt & kvarts fönster

Vid testerna får avvikelser om någon enstaka procent anses vara godtagbara. Avvikelser med flera procent motiverar användning av den metod som anses ge mest korrekta resultat.

6.2.1 Jämförelse mellan HEAT2 & HEAT3

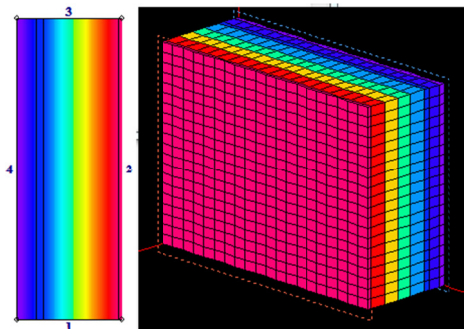
En analys av vilket av de båda programmen som lämpar sig bäst vid de olika beräkningarna utförs. Det innebär en stor tidsbesparing om HEAT2 kan användas istället för HEAT3, vilken kräver komplexare modelleringar. Ett antal jämförelser mellan resultaten från HEAT2 och HEAT3 utförs för att avgöra om dessa skiljer sig åt och på så sätt motivera användning av enbart HEAT2. De detaljer som i denna rapport anses vara lämpliga att undersöka är värmefflöde genom vägg, kanter, fönster och hörn. Med dessa jämförelser kan besluten att använda de olika programmen motiveras och visa på skillnader som uppstår om ett program som förenklar modeller för mycket används.

Vägg: Vägg är en uppreglad vägg med puts från typritningarna och har måtten 1x1 m². Värmeflödet genom väggen jämförs i HEAT2 och HEAT3 och beräknas med ekvation 4.1. I detta fall används standardvärdena för cellindelning i respektive program.

$$q_{väggHEAT2} = 0,1140 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$q_{väggHEAT3} = 0,1148 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Flödena blir mycket lika, och avvikelserna 0,008 W/(m·K) eller knappt 1 %. I figur 6.1 illustreras väggen i HEAT2 och HEAT3.



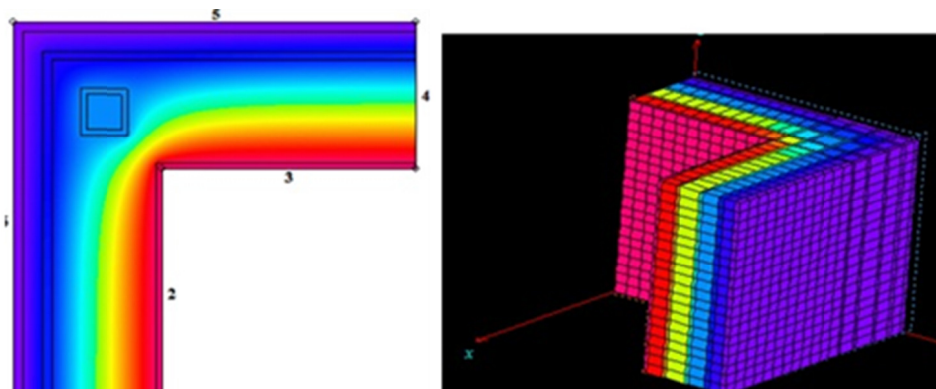
Figur 6.1 - Vägg i 2D och 3D.

Kant: En stålpelare, VKR120, placeras i mellersta isoleringsskiktet i kanten på husväggen. Den utvändiga längden på väggen är här en meter i varje riktning vilket ger den invändiga längden 0,633 m i båda riktningar och i HEAT3 är höjden en meter, se figur 6.2. Köldbryggorna i HEAT 2 och HEAT3 beräknas enligt ekvation 4.1. I beräkningen sätts cellindelningen till samma i båda programmen.

$$q_{kantHEAT2} = 0,1725 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$q_{kantHEAT3} = 0,1724 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Det kan konstateras att HEAT2 och HEAT3 beräknar resultaten med cirka 0,05 % avvikelse. Med samma cellindelning blir resultatet mer likt än vid programmets förinställda värden, trots komplexare modellering.



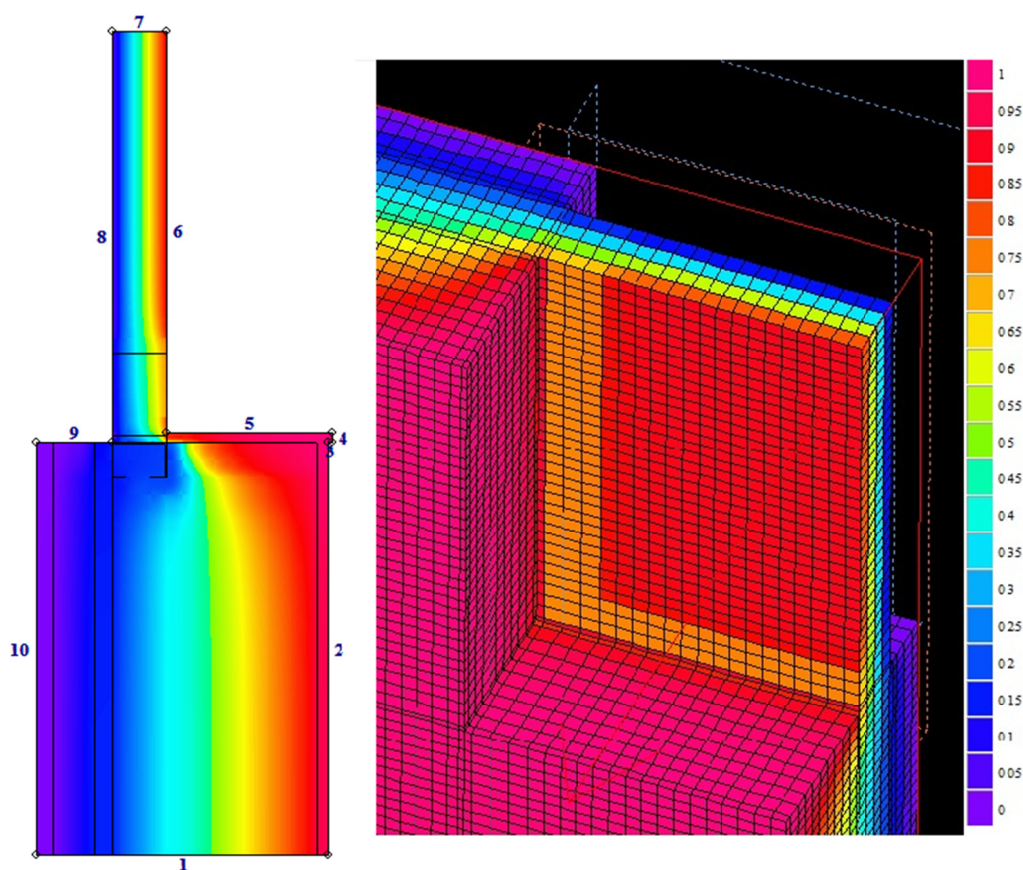
Figur 6.2 - Väggekant i 2D respektive 3D.

Fönsteranslutning: Fönstret är egentligen inte möjligt att modellera korrekt i HEAT2, men ett tvärsnitt av fönstrets kant går att modellera. Modellen i HEAT2 har 720 mm glas, 100 mm karm, 10 mm drevning och två meter vägg. Modellen i HEAT3 består av ett kvarts fönster med måtten 0,820x0,445 m² och 10 mm drevning runt omkring. Väggens symmetrilinje sträcker sig två meter ut från fönsteranslutningen. Karmen i fönstret utgör 100 mm av fönstermåtten. Beräkningen för HEAT2-modellen sker enligt ekvation 4.11 medan och ger ett värde för det linjära värmeflödet. Med HEAT3 kan beräkningen utföras enligt ekvation 4.12.

$$\Psi_{fönsterHEAT2} = 0,8153 - 0,72 \cdot 0,6 - 0,1 \cdot 1,54 - 2,0 \cdot 0,0918 - 0,0043 = \mathbf{0,0414 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}$$

$$\Psi_{fönsterHEAT3} = \frac{0,9914 - 0,329 - 0,005 - 0,603}{1,265} = \mathbf{0,0429 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}$$

Skillnaden mellan HEAT2 och HEAT3 blir ca 3,6 % vilket motiverar användning av HEAT3 vid fönsterberäkningar. I figur 6.3 illustreras de modellerade fönsterna i HEAT2 och HEAT3.



Figur 6.3 - Fönsteranslutning i 2D och 3D.

Hörn: Hörnet är inte heller möjligt att modellera i HEAT2 och en riktig jämförelse kan inte göras. En hörnkonstruktion med måtten $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ designas och med hjälp av HEAT2 och HEAT3, se figur 6.4, kan hörnets köldbrygga beräknas och sättas i relation till värmeflödet genom konstruktionen vilket i sin tur kan motivera valet av framtida beräkningar. Först beräknas linjeköldbryggan för kanten:

$$\Psi_{kantHEAT2} = 0,2981 - 2 \cdot 0,8 \cdot 0,1397 = \mathbf{0,0746 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}$$

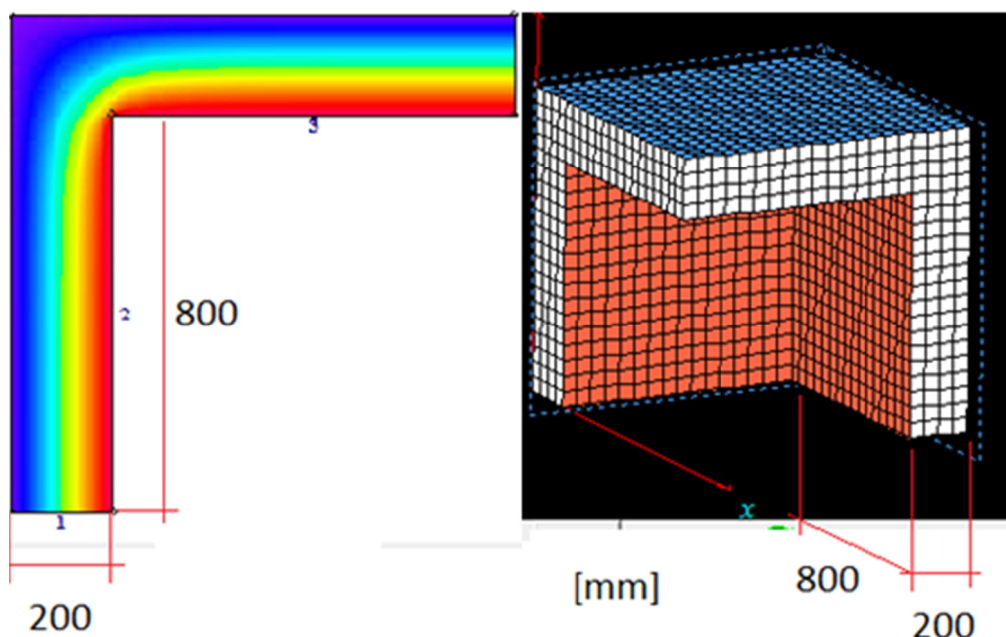
Därefter beräknas värmeflödet genom de kanter som ingår i HEAT3 modellen med värdet för linjeköldbryggan:

$$q_{trekanter,HEAT2} = 3 \cdot 0,8 \cdot 0,0746 = \mathbf{0,1790 \text{ W/K}}$$

Efter det så beräknas det totala värmeflödet genom konstruktionen med HEAT3 och värmeflödet genom väggar och kanter dras av för att beräkna punktköldbryggan i hörnet:

$$\chi_{hörnHEAT3} = 0,3807 - 3 \cdot 0,1397 \cdot 0,8^2 - 0,179 = \mathbf{-0,0665 \text{ W/K}}$$

Det beräknade värmeflödet blir negativt vilket innebär att det inte går att använda sig av HEAT2 för beräkningar av hörn eftersom värmeflödet inte kan bli negativt. Hörn måste alltså beräknas i HEAT3.



Figur 6.4 - Test av hörn i HEAT2.

6.2.2 Avstånd till symmetrilinje

Symmetrilinjen till köldbryggan i en väggkant undersöks för att hitta ett lämpligt avstånd vid vilket resultatet påverkas så lite som möjligt. Modellen får inte bli alltför stor då det leder till att cellindelningen blir dålig, vilket i sin tur ger sämre resultat i HEAT. De avstånd som testas är 0,5, 1,0, 1,5 och 2,0 m från köldbryggan, vilket innebär att väggen sträcker sig så långt åt två håll från köldbryggan och avdrag måste alltså göras för båda sidor. Köldbryggan är i detta fall den i en väggkant i Beckomberga. Nedan redovisas de beräknade värden på köldbryggan, enligt ekvation 6.1, när avståndet till symmetrilinjen varieras:

$$\Psi_{i m} = q_{del} - q_{vägg} \cdot l_{vägg} \quad (\text{ekv. 6.1})$$

$$\Psi_{0,5 m} = 0,0259 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\Psi_{1,0 m} = 0,0257 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\Psi_{1,5 m} = 0,0254 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\Psi_{2,0 m} = 0,0253 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Skillnaden i storlek på köldbryggan mellan 1,5 och 2,0 m är 0,4 %, att jämföra mot skillnaden mellan 0,5 och 2,0 meter på 2,4 %. Skillnaden blir givetvis större ju närmare köldbryggan symmetrilinjen närmar sig, men en avvikelse om 0,4 % per halvmeter anses som godtagbart i denna rapport. Därför kommer beräkningarna som utförs härnäst använda 2,0 m som mått på avståndet till symmetrilinjen, utom i specialfall vilka redovisas vid de berörda detaljerna.

6.2.3 Inverkan av cellindelning

För att få bästa resultat är störst antal celler det bästa. Men för att avgöra när ökad cellindelning inte ger några större förbättringar i resultaten utförs tester i HEAT2 och HEAT3. Cellindelningen i HEAT2 varieras mellan 50, 100, 200 samt 2000 och i HEAT3 20, 60, 100 samt 130. Dessa värden är de förinställda valbara värdena samt det maximala värdet för respektive program.

Två detaljer, en takkant och en väggkant, beräknas och modelleras i HEAT2 enligt ekvation 4.1 och ett takhörn beräknas och modelleras enligt ekvation 4.2 i HEAT3 med ovan nämnda indelningar för att undersöka hur cellindelningen påverkar resultatet. I tabell 6.1 presenteras värden från beräkning av dessa köldbryggor med olika antal celler.

Tabell 6.1 – Test av cellindelning.

Cellindelning [Antal celler]	q_{ber} [W/(m ² ·K)]	q_{ref} [W/(m ² ·K)]	ψ [W/(m·K)]
Väggkant HEAT2			
50	0,3922	0,3672	0,0250
100	0,3925	0,3672	0,0253
200	0,3929	0,3672	0,0257
2000	0,3946	0,3672	0,0274
Takhörn HEAT3			
20	1,1249	1,0841	0,0259
60	1,1427	1,0965	0,0257
100	1,1482	1,1001	0,0254
130	1,1501	1,1016	0,0253
Takkant HEAT2			
50	0,4433	0,3536	0,0897
100	0,4452	0,3540	0,0912
200	0,4458	0,3542	0,0916
2000	0,4464	0,3544	0,0920

Skillnaden mellan största och minsta värden i två testade konstruktionsdelar blir 2,6 % för HEAT2 och 2,4 % för HEAT3. Intressant att notera är även att köldbryggan ökar med fler celler i HEAT2 och minskar med fler celler i HEAT3. Ytterligare en detalj kontrolleras, denna gång väggkanten i HEAT3. Detta för att undersöka inverkan då en av delarna är helt homogen, i detta fall väggdelarna vid sidan om kanten, där värmeflödet endast är rakt utåtriktat. I detta fall blir skillnaden mellan högsta och lägsta värde 9,8 %, med en ökande köldbrygga vid fler celler.

När köldbryggan för väggkanten beräknas i detta test är det intressant att notera att väggens homogena del inte påverkas av cellindelningen då värmeflödet rakt från varm till kall sida är utan inverkan av köldbryggor. Detta visar på att cellindelningen endast påverkar resultatet i konstruktioner som inte är homogena. I sådana konstruktioner bör högsta värde för cellindelning användas.

I modeller där både referensfall och beräkningsmodell påverkas likvärdigt av cellindelningen är skillnaden i denna rapport godtagbar med ca 2,5 %. I dessa fall används det förinställda värdet, vilket är 200 för HEAT2 och 20 för HEAT3. I fall där referensfallet är en homogen del med konstant värde används högsta möjliga cellindelning för att vara på "den säkra sidan".

6.2.4 Kvarts & helt fönster i HEAT3

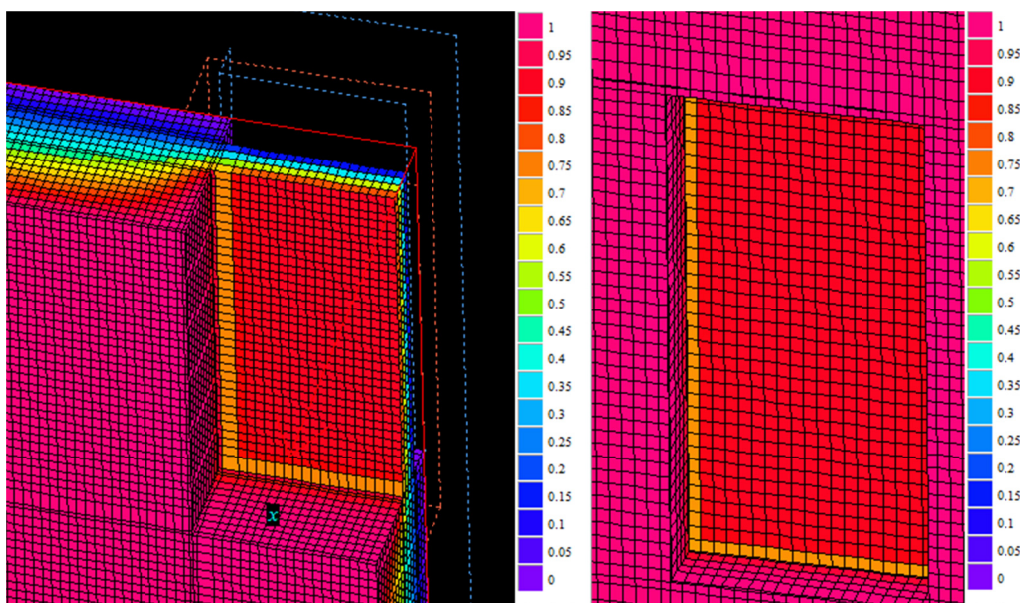
Det finns flera fördelar med att endast modellera en del av fönstret istället för att modellera hela konstruktionen. Det första är enkelheten, då en HEAT3 modell tar lång tid att modellera. Den andra uppenbara fördelen är att antalet celler per areaenhet i modellen ökar, vilket ger en bättre upplösning och noggrannhet på beräkningen. För att denna typ av förenkling skall vara möjlig krävs dock ett fönster som är så pass symmetriskt att fyra lika kvartskonstruktioner kan representera hela konstruktionen.

Vid en enkel jämförelse mellan metoden att modellera fönster som en fjärdedel respektive helkonstruktion visade det sig att skillnaden mellan resultaten var försumbar. I båda fallen går de yttre symmetrilinjerna två meter ut i väggen från fönsterkarmen.

$$\Psi_{kvartsfönster} = 0,0605 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\Psi_{helfönster} = 0,0608 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

För kvartsdelen blev linjeköldbryggan 0,0605 W/(m·K) och för helkonstruktionen 0,0608 W/(m·K). Skillnaden blir mindre än 1 % och därför används modellen med kvartsfönster hädanefter i modelleringen av fönster. Den ökade celltätheten visas i figur 6.5.



Figur 6.5 - Kvartskonstruktion respektive helkonstruktion för standardfönster från Beckomberga i HEAT3, 1640x890 mm².

6.3 HEAT – Modellparametrar

Nedan presenteras de tester av modellparametrar i HEAT som genomförts i denna rapport och resultaten från de olika jämförelserna. Detta görs för att bestämma det bästa utförandet som ger de mest representativa resultaten. De jämförelser som anses lämpliga för att presentera rimliga resultat är:

- Marktyper – Morän, sand & silt
- Modellering av invändiga kanter & hörn
- Reglar – Stål & trä

Precis som för programparametrar anses avvikelser om någon enstaka procent vara godtagbara. Medan avvikelser med flera procent motiverar användning av den metod som anses ge mest korrekta resultat.

6.3.1 Marktyper – Morän, sand & silt

I Sverige finns det många olika sorters marktyper bestående av olika material och i olika sammansättningar. Detta gör att de olika marktyperna har olika värmemotstånd. Beroende på marktypen så kommer transmissionsförlusterna i en byggnad genom golvet variera på grund av att marken fungerar som isolering. Tre vanliga marktyper testas, med köldbryggan i kantbalken från typritningen, med andra ord Beckomberga och beräknas med ekvation 4.1. Resultaten av dessa beräkningar redovisas nedan. De tre marktyperna är morän, sand och silt, med ett respektive värmemotstånd på 2,3, 1,5 och 0,43 W/(m·K):

$$\begin{aligned}\Psi_{morän} &= \mathbf{0,4044 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}} \\ \Psi_{sand} &= \mathbf{0,3906 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}} \\ \Psi_{silt} &= \mathbf{0,3421 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}\end{aligned}$$

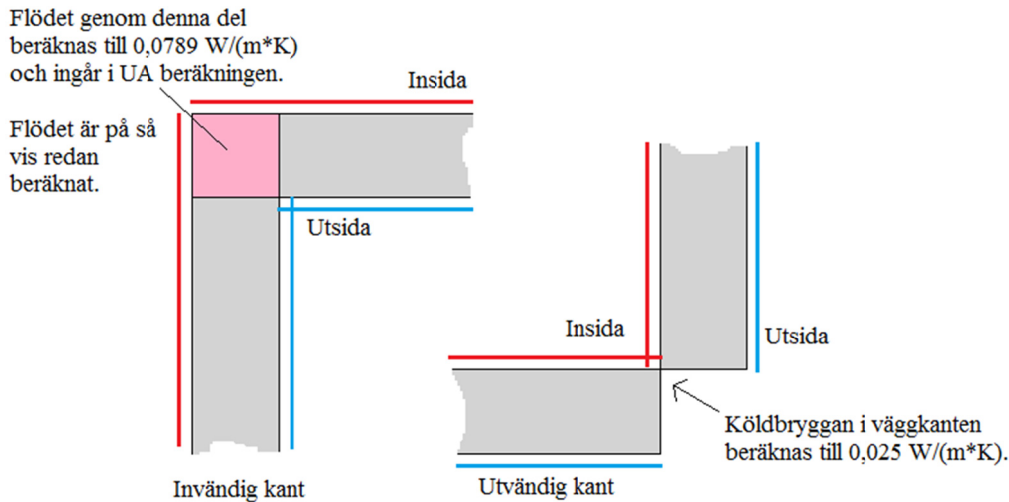
Transmissionsförlusterna i köldbryggan för kantbalken skiljer sig med upp till 17 % mellan silt och morän. Därför används morän som marktyp i denna rapport för att inte underskatta transmissionsförlusterna vid beräkning av köldbryggan i kantbalken.

6.3.2 Modellering av invändiga kanter & hörn

Med resonemanget att inre kanter och hörn beräknar delen som utgör köldbryggan dubbelt, via den geometriska effekten, tillför dessa delar inget extra värmefflöde. I teorin skulle dock andelen regler i ett inre hörn vara så stort att det överväger den geometriska effekten. Därför kontrolleras en inre väggkant från Beckomberga och resultatet av beräkningarna redovisas nedan. Väggkantens väggar är cirka 430 mm tjocka. Köldbryggan beräknas till 0,025 W/(m·K) och värmefflödet genom väggen till 0,0918 W/(m²·K). I en inre kant har redan kantens yta lagts till i beräkningen av UA vilket betyder att ytan av 430 + 430 [mm]/m, väggkant beräknats till värmefflödet genom väggen. Detta värmefflöde beräknas nedan:

$$\begin{aligned}q_{inrekant} &= (0,430 + 0,430) \cdot 0,0918 = \mathbf{0,079 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}} \text{ (ekv. 6.4)} \\ \Psi_{väggkant} &= \mathbf{0,025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}\end{aligned}$$

Värmeflödet som redan lagts till UA är alltså 0,079 W/(m·K) per meter köldbrygga för inre väggkantar att jämföra med 0,025 W/(m·K) vilket är värmeflödet i en yttre väggkant. Eftersom en yttre väggkant har högre värmeflöde än en inre och ändå har lägre värmeflöde än vad som redan adderats till UA så anses inre köldbryggor inte behöva beräknas.



Figur 6.6 – Invändiga kanter.

6.3.3 Reglar - Stål & trä

Efter tester av materialegenskaper har det visat sig att slitsade stålreglar kan ersättas med träreglar i HEAT-modelleringen, då stålregeln är u-formad och fylld med isolering. Det sammanvägda U-värdet och värmegenomgångsmotståndet blir i detta fall samma. Men det gäller bara för just slitsade stålreglar då dessa har lägre värmeledningsförmåga än vanliga stålreglar. Tack vare denna egenskap kan träreglar, som är lättare att modellera i HEAT, användas i modeller där bara värmeflödet efterfrågas. Däremot måste stålreglarna modelleras som de är utformade om syftet är att hitta temperaturer i en viss punkt i konstruktionen.

Testet utförs med träreglar av dimensionen 70x45 mm² och med $\lambda = 0,13$ W/(m·K). Slitsade stålreglar antas ha $\lambda = 5$ W/(m·K) och en godstjocklek på 1 mm. Vanligt stål antas till $\lambda = 50$ W/(m·K). Stålreglarna fylls i modellen med mineralull med $\lambda = 0,036$ W/(m·K). I tabell 6.2 nedan redovisas de beräknade värmeflödena för reglarna.

Tabell 6.2 - Test av regelutförande.

	$\lambda_{trä}$ = 0,13 W/(m·K)	$\lambda_{stål} = 5$ W/(m·K)	$\lambda_{stål} = 50$ W/(m·K)
Regel	0,0618	0,0615	0,1782

Det visar att om slitsade stålreglar har ett $\lambda = 5$ W/(m·K) så motsvarar de värmeflödet för en träregel med $\lambda = 0,13$ W/(m·K).

6.4 Förutsättningar – Referensobjekt

De beräkningsmetoder som beskrivits i kapitel 5: Beräkningsmetoder gäller för beräkningarna i samtliga referensobjekt. Det finns dock några fall där beräkningarna behöver förtydligas och vissa antaganden måste göras. Dessa fall presenteras mer ingående nedan.

6.4.1 Tak

I Beckomberga är takisoleringen triangulär längst ut i takfoten, vilket ger vissa begränsningar i HEAT som inte klarar av polygoner av den storlek som behövs för en korrekt modellering. Här har rektangulära segment som ökar med 100 mm använts istället.

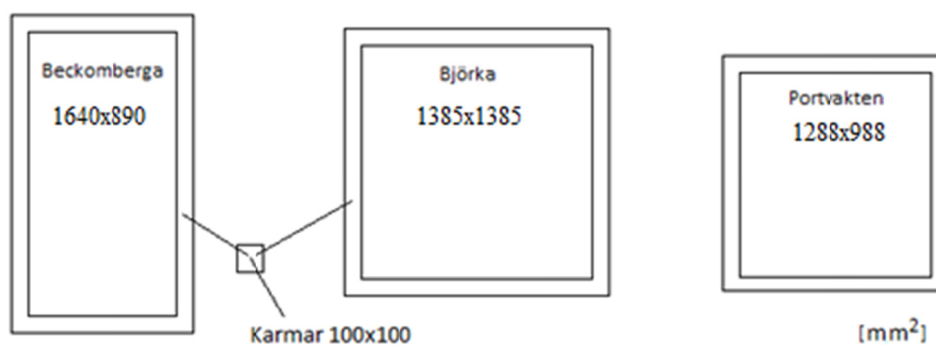
6.4.2 Balkonger

Balkonger finns i alla referensobjekten men endast i Beckomberga påverkar balkongkonstruktionen värmeffödet. Smarta lösningar med fristående balkonger tar bort köldbryggan i Björka och i portvakten fästs balkongen i vajrar som sitter bultade i väggen.

Detaljer för infästning av balkonger standardiseras så långt som möjligt och företaget Halfen erbjuder ett stort utbud av balkonginfästningar. Värden för dessa köldbryggor presenteras och rör sig i ett intervall från ca 0,16 till 0,25 W/(m²·K). Ett rimligt värde att använda vid generella beräkningar antas därför vara 0,20 W/(m²·K) (Halfen, 2012).

6.4.3 Fönster

I samtliga referensobjekt förekommer flera olika fönstertyper och för varje referensobjekt väljs det vanligaste fönstret ut att representera samtliga fönster i det referensobjektet. För att underlätta modellering och jämförelser mellan värden på köldbryggorna i fönsteranslutningen sätts karmens tjocklek lika på alla fönster, med måtten 100x100 mm² och glasets tjocklek till 100 mm. För att representera drevning och justermån modelleras 10 mm isolering mellan fönsterhålet och karmen i samtliga fönstermodeller. Referensobjektens fönster presenteras i figur 6.6.



Figur 6.6 - Fönster i referensobjekten.

Med förenkling av modellen, mått och U-värden från referensobjekten kan värmeledningsförmågan beräknas för respektive fönsterdel. I tabell 6.2 sammanställs de framräknade värdena för fönstrens ekvivalenta λ -värden. Dessa används sedan i HEAT-modelleringen för att beräkna köldbryggan i fönsteranslutningen för respektive referensobjekt. Regelstommen kring Beckombergas fönster modelleras genom att placera en 23 mm tjock längsgående träskiva i fönsterhålet.

Tabell 6.2 – Sammanställning av fönstervärden.

Referensobjekt	$U_{\text{fönster}}$ [W/(m ² ·K)]	U_{glas} [W/(m ² ·K)]	U_{karm} [W/(m ² ·K)]	λ_{glas} [W/(m·K)]	λ_{karm} [W/(m·K)]
Beckomberga	0,9	0,75	2,21	0,086	0,354
Björka	0,9	0,75	1,4	0,086	0,184
Portvakten	1,0	0,85	1,506	0,099	0,202
Standardfönster	1,1	0,9	1,846	0,106	0,269
Passivhusfönster	0,8	0,5	1,92	0,055	0,285

7. Resultat

I detta kapitel redovisas alla resultat från de hundratalet HEAT beräkningarna som utförts för de olika referensobjekten. En sammanställning av det totala antalet köldbryggor och deras VFT redovisas. Sist presenteras en termografering på Björka vilket ger en uppfattning om hur resultaten och faktiska temperaturer förhåller sig till varandra.

7.1 Beräkningsresultat – köldbryggor

Med typritningar och referensobjekt som underlag har generella procentsatser för köldbryggor i flerbostadshus beräknats. Nedan presenteras resultaten från dessa beräkningar i form av referensobjektens köldbryggor, typ för typ och sammanvägd mängd.

En sammanställning av de beräknade transmissionsförlusterna för referensobjektens köldbryggor finns i tabell 7.1 nedan. I Bilaga - Beräkningar återfinns beräknade värden för samtliga testade anslutningar.

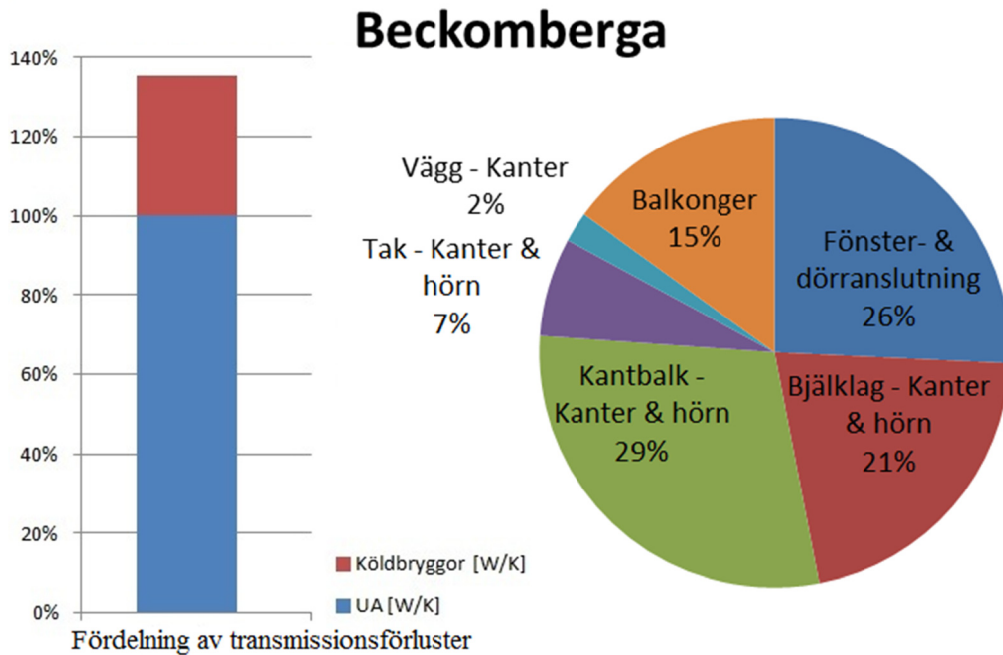
Tabell 7.1 – Sammanställning av beräknade värmeflöden för köldbryggor.

Linjeköldbryggor (ψ)	Portvaktan	Björka	Beckomberga
	[W/(m·K)]	[W/(m·K)]	[W/(m·K)]
Fönster- & dörranslutning	0,045	0,079	0,043
Bjälklag, trä	0,035	-	-
Bjälklag, betong	0,027	0,107	0,072
Kantbalk	0,306	0,151	0,395
Takkant	0,033	0,024	0,092
Hög långsida	-	0,014	-
Låg långsida	-	0,019	-
Väggkant, Vån. 1	0,057	0,049	0,025
Väggkant, Vån. 2-8	0,031	0,049	0,025
Lägenhetsskiljandevägg	-	0,027	-
Balkonginfästning	-	-	0,200
Punktköldbryggor (χ)	[W/K]	[W/K]	[W/K]
Takhörn	0,004	0,013	0,046
Kantbalkshörn	0,128	0,032	0,117
Bjälklagshörn	0,004	0,023	0,033

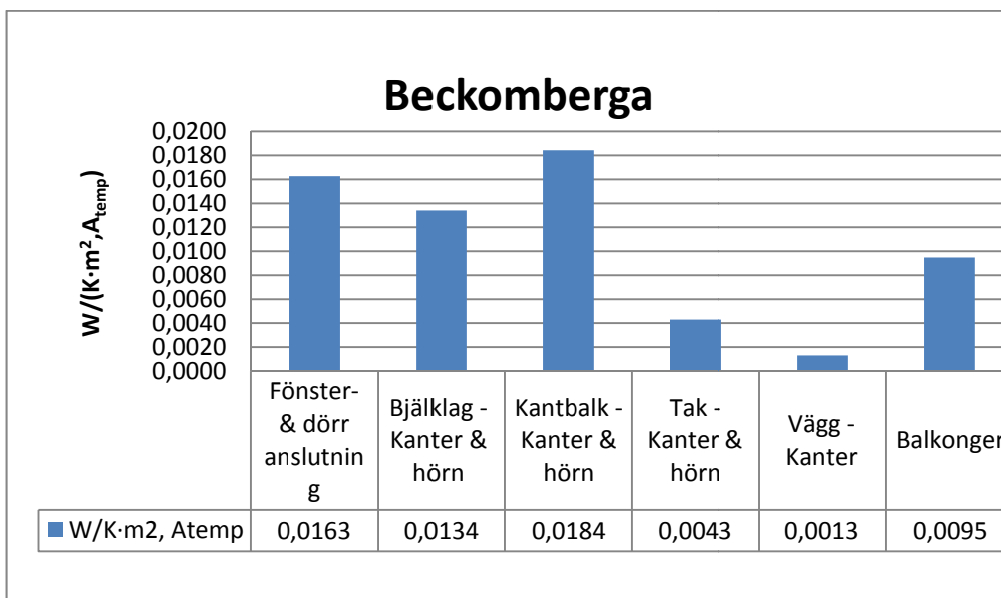
Några anmärkningsvärda slutsatser från resultaten i tabellen ovan är hur stora transmissionsförlusterna genom kantbalken blir i förhållande till övriga köldbryggor. Kantbalkens köldbrygga är beräknat under förutsättningen att marken är morän med värmeledningsförmågan 2,3 W/(m·K), vilket anses vara en vanlig jordart i Sverige. Anmärkningsvärt är också att hörnen skiljer sig mycket åt, där portvaktens konstruktion har den lägsta transmissionsförlusten.

7.1.1 Beckomberga

Beckombergas konstruktion består till stor del av de typritningar som tagits fram för lågenergihus. I figur 7.1 presenteras fördelningen av Beckombergas köldbryggor och i figur 7.2 presenteras köldbryggornas transmissionsförluster per m^2 , A_{temp} . Andel fönsterarea av A_{temp} i Beckomberga är beräknad till 11 %.



Figur 7.1 – Fördelning av köldbryggona i Beckomberga.

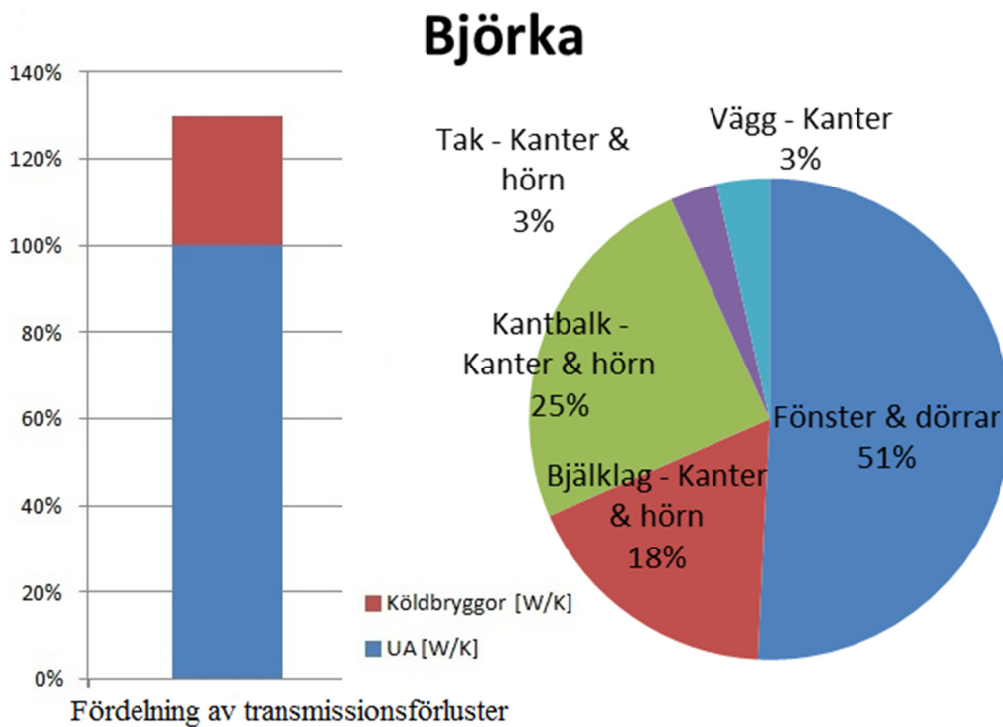


Figur 7.2 – Transmissionsförluster för köldbryggona i Beckomberga.

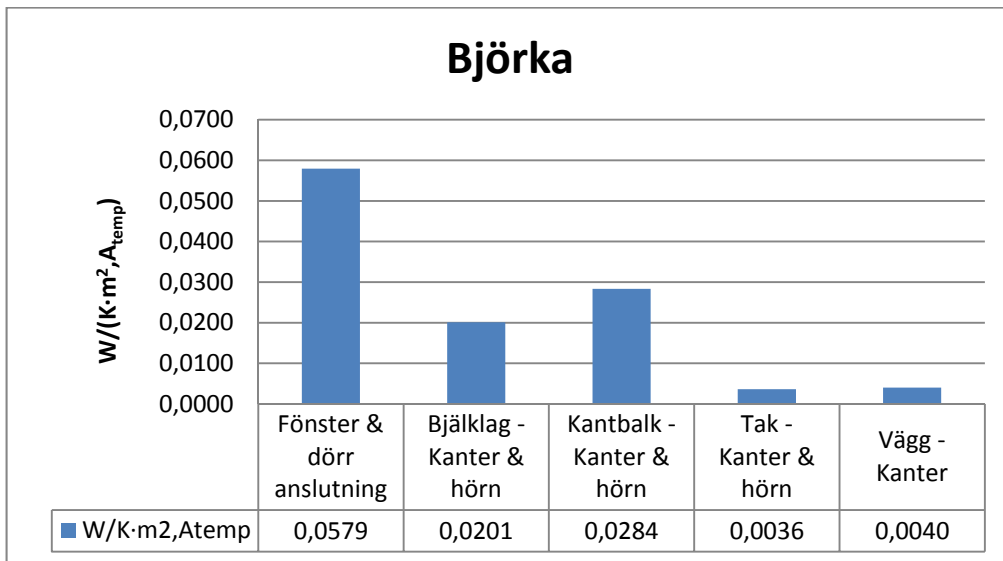
I figurerna 7.1 och 7.2 kan utläsas att den största andelen köldbryggor i Beckomberga utgörs av kantbalk, men fönster- och dörranslutningar samt bjälklagen utgör nästan lika stora andelar. Även balkonger utgör en stor del av fördelningen, men då balkongernas köldbryggor endast har beräknats i Beckomberga kan cirkeldiagrammet vara missvisande i jämförelse mellan referensobjekten. Därför är det intressant att titta på de faktiska transmissionsförluster som köldbryggorna utgör i respektive referensobjekt.

7.1.2 Björka

Björka kan anses representera typhuset för Finjas Klimatvägg. I figur 7.3 visas fördelningen av köldbryggor i Björka och i figur 7.4 visas köldbryggornas transmissionsförluster per m^2 , A_{temp} . Andel fönsterarea av A_{temp} i Björka är beräknad till 17 %.



Figur 7.3 – Fördelning av köldbryggorna i Björka.



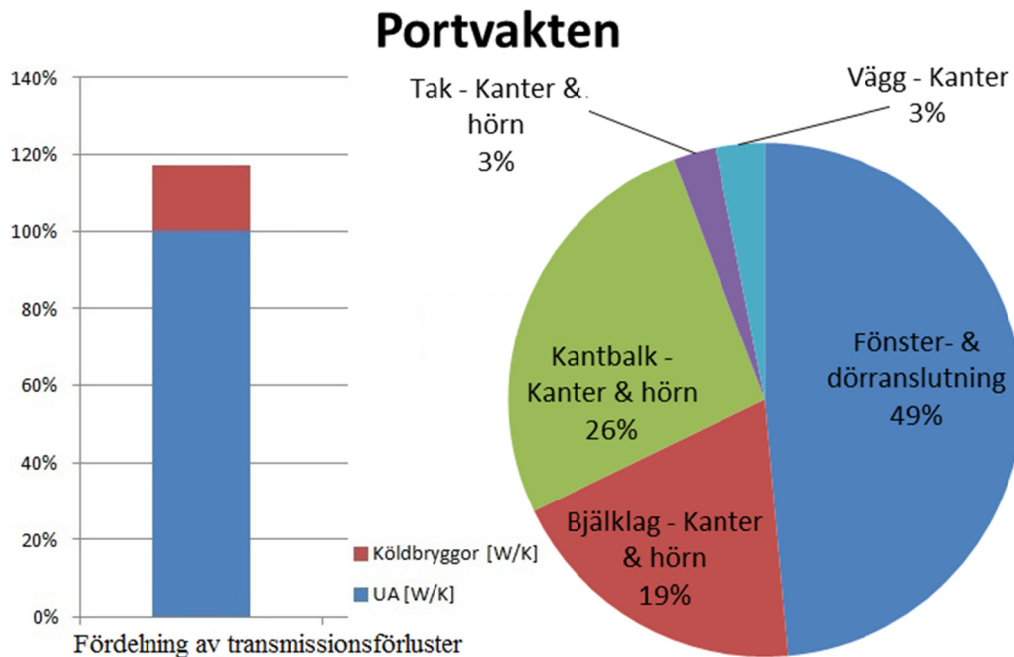
Figur 7.4 – Transmissionsförluster för köldbryggona i Björka.

Ur figur 7.3 och 7.4 kan utläsas att fönster- och dörranslutningen utgör de största köldbryggorna i klimatväggskonstruktionen med runt hälften av de totala transmissionsförlusterna genom köldbryggor. Av resterande köldbryggor utgör kantbalk och bjälklagsanslutning majoriteten. Observera att det i jämförelse med Beckomberga är förhållandevis stor fönsterarea av A_{temp} i Björka, vilket kan vara en bidragande faktor till andelen köldbryggor i fönsteranslutningar.

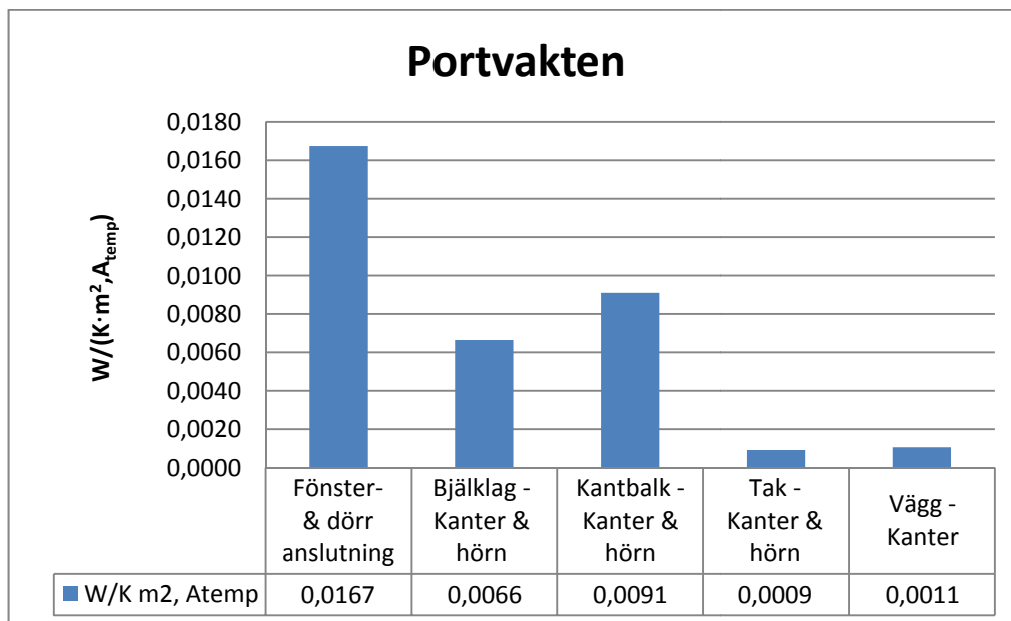
En svårighet med direkt jämförelse av andel köldbryggor kan illustreras med en jämförelse mellan kantbalken i Beckomberga och Björka. I Beckomberga utgör kantbalken en något större andel av transmissionsförlusterna genom köldbryggor än i Björka, men sett till värmefflöde per m^2 , A_{temp} har kantbalken i Björka nästan det dubbla värmefflödet. Det bör också påpekas att Björkas kantbalkskonstruktion har lägst enskilt värmefflöde av de tre kantbalkskonstruktionerna i referensobjekten. Detta visar på att A_{temp} har en stor inverkan vid beräkningar av andel köldbryggor.

7.1.3 Portvakten

Med en unik träkonstruktion representerar Portvakten ett byggnadssystem i massivträ. Fördelningen av köldbryggor och dess transmissionsförluster per m², A_{temp} visas i figur 7.5 respektive 7.6 nedan. Andelen fönsterarea av A_{temp} i Portvakten är beräknad till 10 %.



Figur 7.5 – Fördelning av köldbryggona i Portvakten.



Figur 7.6 – Transmissionsförluster för köldbryggona i Portvakten.

Ur figur 7.5 och 7.6 kan utläsas att precis som för Björka utgör anslutningarna vid fönster och dörr de största köldbryggorna med runt hälften av de totala transmissionsförlusterna genom byggnadens köldbryggor. Även i Portvakten står kantbalk och bjälklag för huvuddelen av de resterande köldbryggorna. Något som bör uppmärksammas är dock att värmeflödet genom fönster- och dörranslutningarna i Portvakten utgör mindre än en tredjedel av värmeflödet genom fönster- och dörranslutningar i Björka, om man ser till värmeflöde per m^2 , A_{temp} . Detta kan till viss del förklaras med skillnaden i fönsterarea, men även att fönsteranslutningen i Björka har ett högre värmeflöde och att A_{temp} är större i Portvakten.

7.1.4 Vallda Heberg

I Vallda Heberg har man åtgärdat behovet av bättre värmegenomgångsmotstånd i kantbalkskonstruktionen genom att placera ett inre skikt cellplast i kantbalken för att reducera värmeflödet från plattan till kantbalken. Isoleringen i plattan och väggen är 400 mm.

För denna konstruktion beräknas linjeköldbryggan till $0,0754 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, under samma förutsättningar som för övriga kantbalksberäkningar. Detta värmeflöde är avsevärt lägre än för referensobjektens kantbalkar.

7.2 Sammanställning av andel köldbryggor

En summering av köldbryggorna för varje referensobjekt utförs med hjälp av de mått som redovisats i kapitel 5: Referensobjekt för att beräkna den totala andelen köldbryggor av UA samt för beräkning av värmeförlusttalet, VFT. Resultaten från beräkningarna sammanställs i tabell 7.2 nedan. Andelen köldbryggor blir för Beckomberga 36 % och för Björka 30 % men betydligt mindre för Portvakten, med 17,5 %. Det är dock viktigt att beakta VFT, värmeförlusttalet, som anger effektförlusten per m^2 , A_{temp} . I detta fall har Beckomberga och Portvakten liknande värden och med ungefär $10 \text{ W}/\text{m}^2, A_{temp}$. För Björka blir motsvarande värde cirka $18 \text{ W}/\text{m}^2, A_{temp}$.

Tabell 7.2– Sammanställning av transmissionsförluster i referensobjekten.

Parameter	Portvakten	Björka	Beckomberga
UA [W/K]	507,4	111,4	285,4
Köldbryggor [W/K]	87,8	33,3	101,65
Andel köldbryggor av UA [%]	17,3	29,9	35,6
VFT _{DVUT} , [W/m ² , A _{temp}]	9,9	18,3	9,9

Beräkningarna som redovisas i tabellen ovan visar på svårigheten att använda sig av andelen köldbryggor av UA som en metod att beräkna de totala transmissionsförlusterna. Trots att Beckombergas andel köldbryggor är stora är VFT förhållandevis lågt. Detta för att konstruktionen i allmänhet är välisolerad men köldbryggornas transmissionsförluster är större än exempelvis de i Portvakten.

7.3 Jämförelse med beräkningsmodellen

I huvudsak finns två metoder för att undersöka de beräkningsresultat som erhålls. I första hand är det att läsa av den energianvändningen som uppmätts i byggnaderna efter minst ett år av brukstid. En annan metod är att med värmekamera avläsa de temperaturer som finns på olika ytor i byggnaden och på så sätt få en uppfattning om temperaturfördelning och värmeläckage genom klimatskalet.

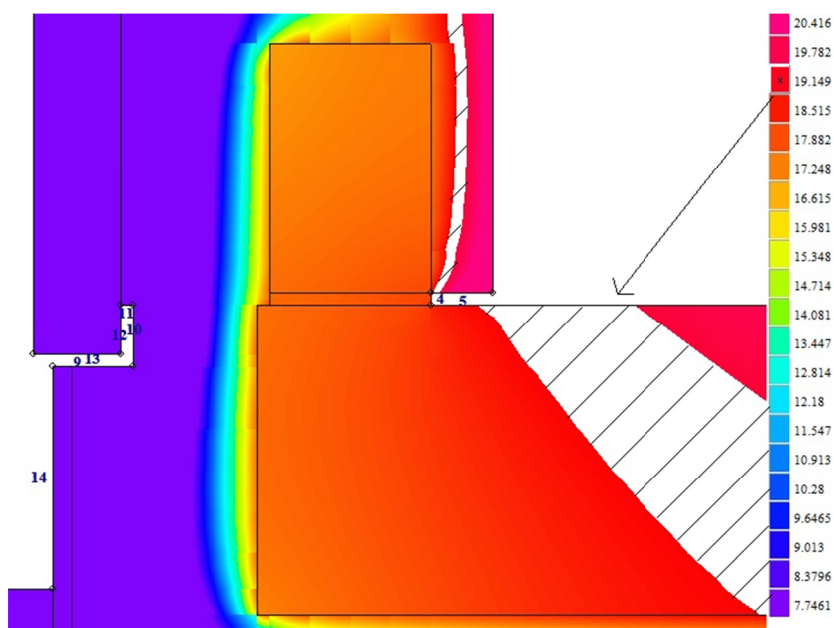
7.3.1 Termografering av Björka

Tack vare möjligheten att termografera Björka i samband med en uppföljning på inomhusklimatet kan en del av HEAT-beräkningarna kontrolleras för att se hur väl beräkningarna överensstämmer med verkligheten. De detaljer som valts ut för kontroll är hörn och kant i golv, bjälklag och tak samt fönsterkarmen. Dessa detaljer täcker in merparten av de totala transmissionsförlusterna genom köldbryggor. Vid jämförelsen används samma modeller som används för köldbryggsberäkningarna i Björka, fast med andra gränstemperaturer och R_{se} .

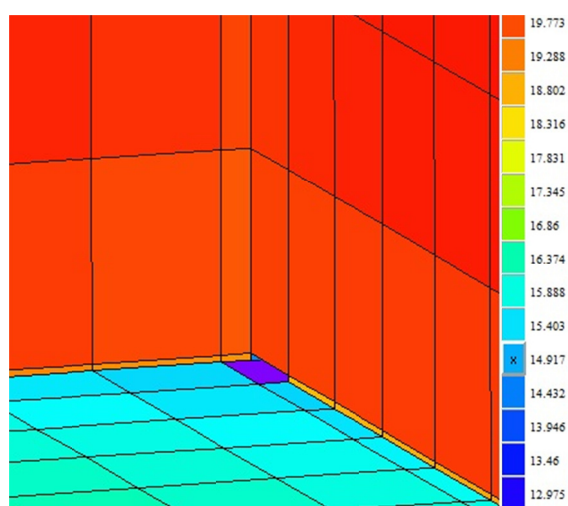
Vid mättillfället var lufttemperaturen utomhus under 1 °C. Under natten hade temperaturen varit mycket lägre, ca -8 °C, vilket uppmättes som yttemperatur på fasaden. I HEAT-beräkningarna används därför -8 °C som utvändigt gränstemperatur, men R_{se} , övergångsmotståndet mellan utvändigt vägg och luft sätts till 0 W/(m²·K) eftersom temperaturen mättes på ytan och därför redan påverkat temperaturen. Temperaturen på insidan sätts till 21 °C i beräkningarna och vid mättillfället varierade dessa mellan ca 20-22 °C. HEAT tar inte hänsyn till värmekonvektion uppåt i rumsluften och det är därför rimligt att temperaturer vid golv blir något lägre och temperaturer vid tak blir något högre än de teoretiska värdena. Avvikelser om någon grad Celsius mellan beräkningar och mätningar får anses vara godtagbara.

Kantbalk

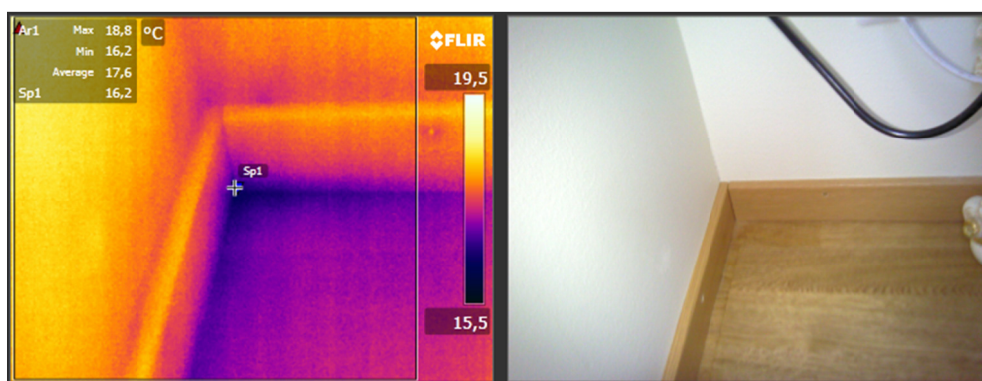
För kantbalken utförs termografering och beräkningar i HEAT2 och HEAT3 för att hitta motsvarande temperaturer. Resultatet från HEAT-beräkningen för kantbalken i Björka under rådande förutsättningar redovisas i figur 7.7 och 7.8 nedan. Termograferingen visas i figur 7.9.



Figur 7.7 – HEAT2-modell av kantbalk. Temperatur ca 19 °C.



Figur 7.8 – HEAT3-modell över kantbalkshörn. Temperatur ca 15 °C.

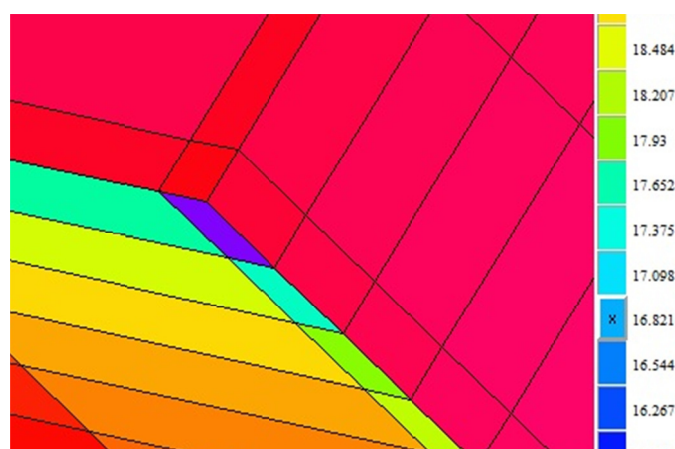


Figur 7.9 – Hörn vid golv där kantbalk möter yttervägg och hörntemperatur ca 16 °C.

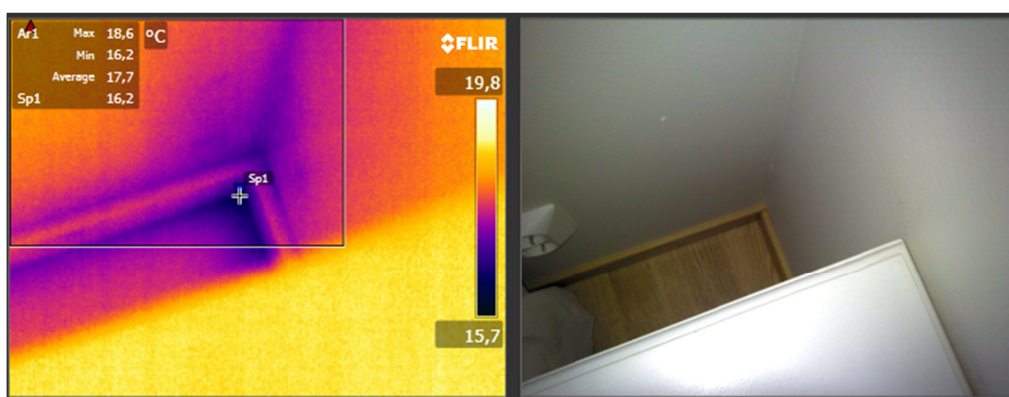
I figur 7.7 är temperaturen $19,149\text{ }^{\circ}\text{C}$ dold för att visa i vilket skikt i anslutningen som överensstämmer med denna temperatur. Denna temperatur är beräknad att uppstå i golvet längs anslutningen mellan vägg och golv. Figur 7.8 visar i sin tur motsvarande konstruktion, fast i kantbalkshörnet där temperaturen $14,917\text{ }^{\circ}\text{C}$ är dold. Figur 7.9 visar en bild tagen vid termograferingen vilken visar de uppmätta temperaturerna på $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ i hörnet. Dessa resultat anses ligga inom felmarginalen om någon grad Celsius.

Bjälklag

För bjälklaget utförs motsvarande termografering och beräkningar i HEAT3 som för kantbalken. I figur 7.10 visas HEAT-beräkningen och i 7.11 visas termograferingen,



Figur 7.10 – HEAT3-modell av bjälklagshörn. Temperatur i hörn $16,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

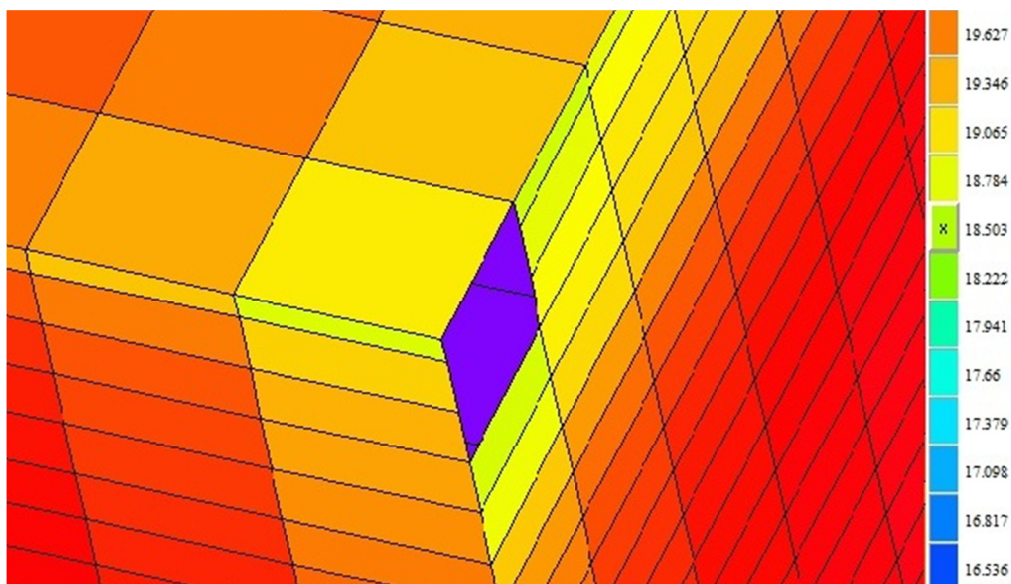


Figur 7.11 – Termograferingsbild över bjälklagshörn. Kanttemperatur $16,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

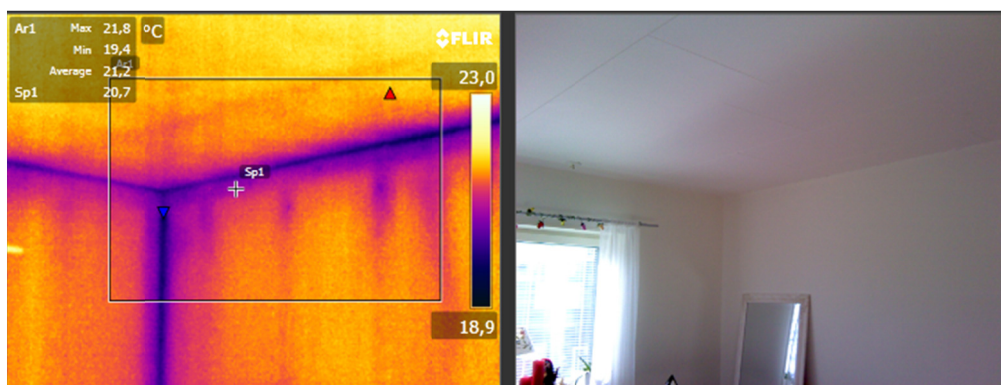
Från figur 7.10 ovan kan utläsas att den beräknade temperaturen i bjälklagshörnet är $16,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ och från figur 7.11 utläses att den uppmätta temperaturen i hörnet var $16,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bjälklagsgolv bör enligt HEAT hålla något högre temperatur än golvhörnen på marknivå, med cirka $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dessa resultat anses ligga inom felmarginalen om någon grad Celsius.

Tak

Beräkningar i HEAT3 och termografering genomförs på takanslutningen. I figur 7.12 och 7.13 nedan redovisas resultatet.



Figur 7.12 – HEAT3-modell över takhörn. Temperatur i hörn ca 18,5 °C.

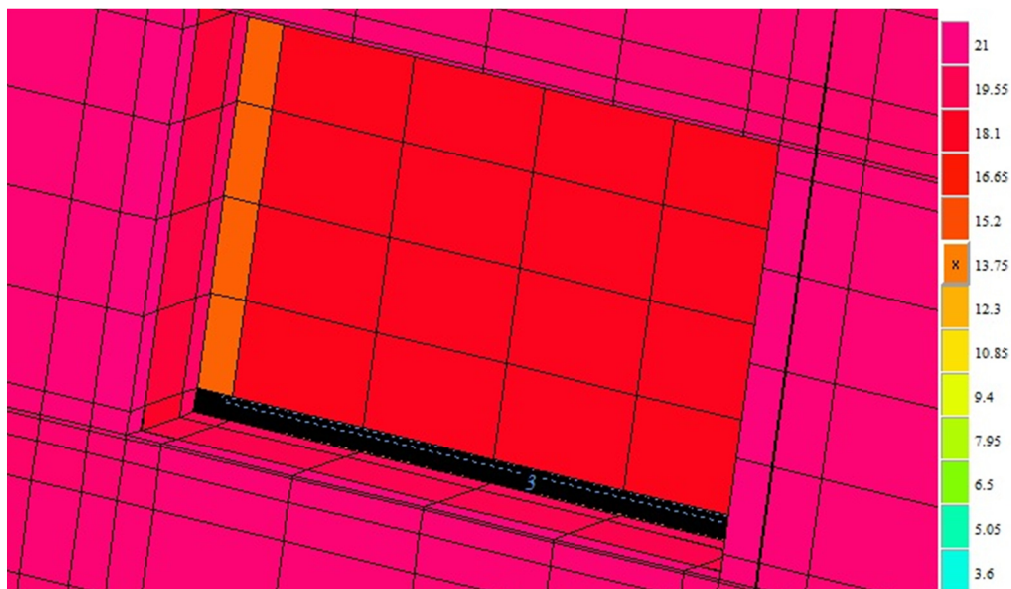


Figur 7.13 – Termograferingsbild över hörn och kant i tak vid anslutning mot yttervägg. Kanttemperatur ca 19°C.

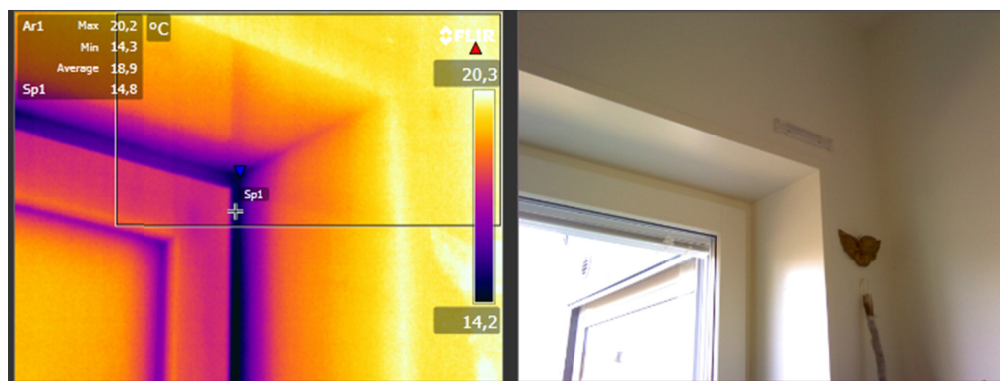
Ur figuren ovan 7.12 ovan kan utläsas att i hörnet på ett tak bör temperaturen bli cirka 18,5 °C enligt HEAT. Från figur 7.13 kan utläsas något högre temperaturer vid mätningen, då punkten med lägsta temperatur längs kanten höll cirka 19,4 °C. Detta kan förklaras med att HEAT inte tar hänsyn till att varm luft stiger och takkanter på så sätt bör hålla något högre temperatur än den beräknade.

Fönster

Ett referensfönster designas i HEAT3 för att lika Björkas fönsterkonstruktion. I figur 7.14 nedan illustreras modellen och kan jämföras med det riktiga fönstret som visas i bild 7.15.



Figur 7.14 – HEAT3-modell över fönsteranslutning. Temperatur ca 14 °C



Figur 7.15 – Termograferingsbild av fönsteranslutning. Temperatur ca 14 °C.

I referensfönstret från figur 7.14 kan olika yttemperaturer analyseras, men det är temperaturen på karmen som är den mest intressanta, då denna har högst U-värde och därmed får lägst temperatur. Enligt modellen bör temperaturen vara runt 13-14 °C. Från figur 7.15 kan utläsas att uppmätta temperaturer längs karm och anslutning var cirka 14 °C vilket är väl inom godtagbar felmarginal. Det bör också påpekas att HEAT3 modellen är en grov förenkling av verkligheten, så resultatet bör tolkas därefter.

8. Analys

I detta kapitel genomförs ett antal analyser på hur köldbryggorna ändrar värde när angränsande ytor varierar. Även hur andelen köldbryggor varierar beroende på byggnadens utformning så som antalet våningar och storleken på fönster undersöks.

8.1 Variationer i detaljer

För att undersöka hur vissa variationer av en byggnadsdel påverkar andelen köldbryggor genomförs känslighetsanalyser av vissa delar som bjälklagets tjocklek eller väggens tjocklek. Från typritningen modelleras putsad och murverksfasad i tre vägg-tjocklekar vardera, vid modellering av kantbalk testas olika vanliga markförhållanden, inverkan av bjälklagstjocklek och andra faktorer som kan påverka modellen.

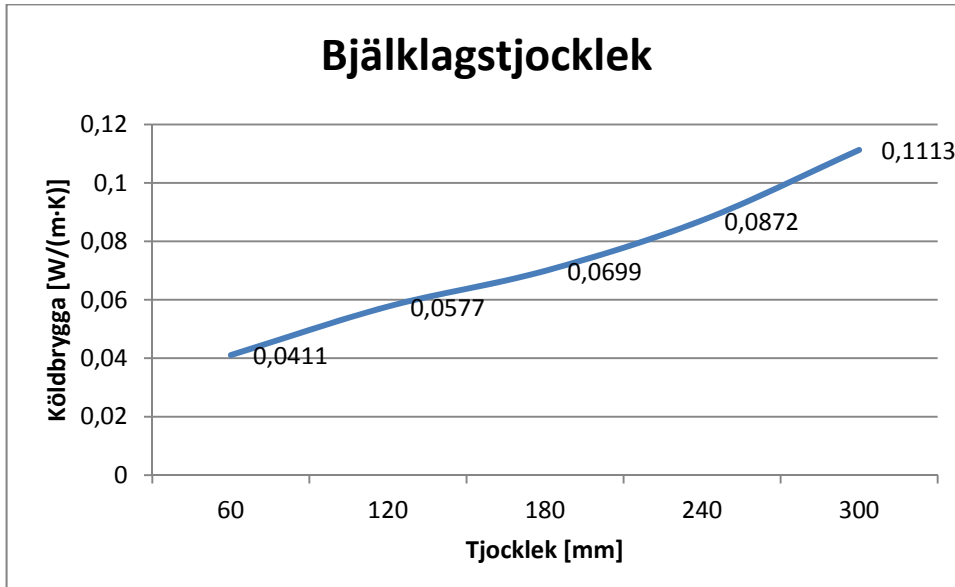
För typritningar i lågenergihus kan variationer utöver Beckombergas dimensioner göras. Exempelvis finns väggar i tre tjocklekar, där ett av väggens isolerskikt varierar med 120, 145 och 195 mm. Tester med olika tjocklek på bjälklag görs, där standardvärden från 60 till 300 mm jämförs. Tre detaljer från typritningarna undersöks och varieras:

- Bjälklag
- Fönster
- Kantbalk

Alla kombinationer av väggar/bjälklag/tak eller liknande kontrolleras inte i denna rapport då omfattningen skulle bli för stor. Däremot visar några beräkningar på trender som kan antas gälla för liknande fall.

8.1.1 Bjälklag

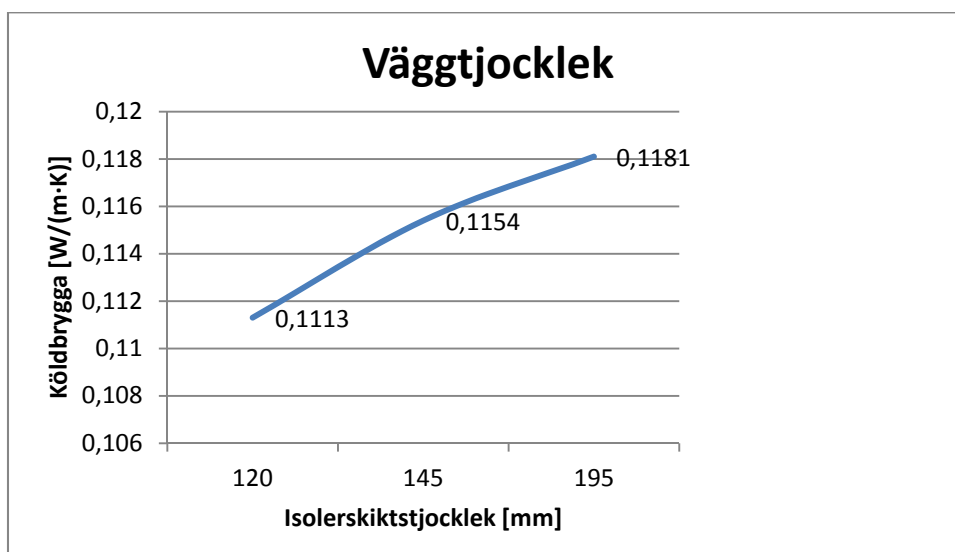
Bjälklagstjocklek: Köldbryggan vid ett betongbjälklag som möter en reglad vägg utförs för fem olika tjocklekar på bjälklag och ger en uppfattning om hur värmeflödet varierar med tjockleken, se figur 8.1.



Figur 8.1 - Köldbryggsförändring avseende bjälklagstjocklek.

Ur diagrammet ovan kan utläsas att köldbryggan ökar när bjälklagstjockleken ökar. Det kan även utläsas att sambandet verkar vara någorlunda linjärt.

Väggstjocklek: För att få en uppfattning om hur väggens tjocklek påverkar köldbryggan görs en jämförelse mellan de tre standardtjocklekarna på vägg, se figur 8.2.

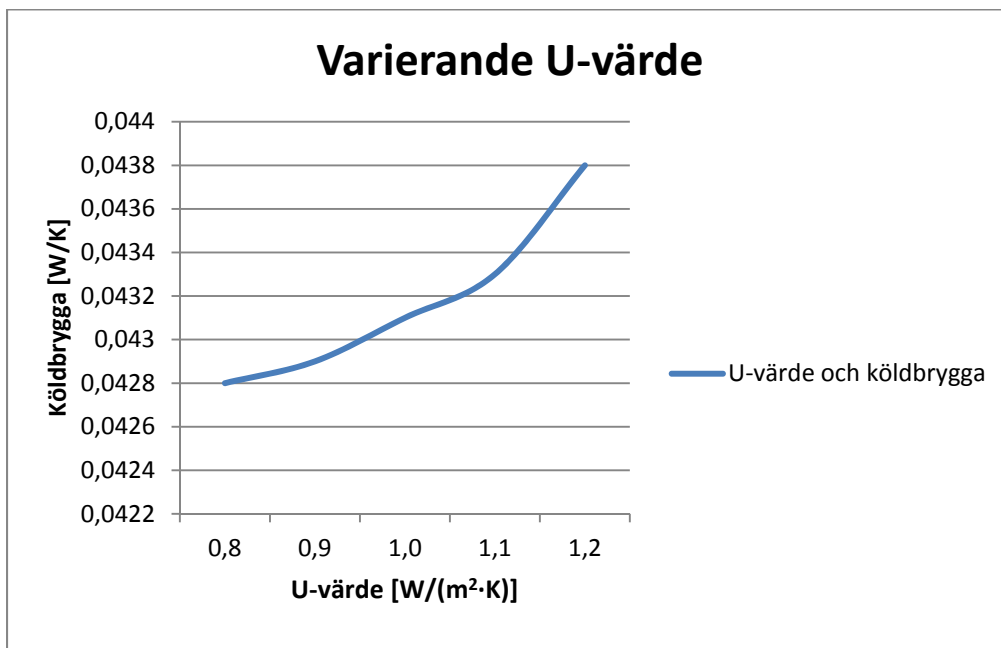


Figur 8.2 - Köldbryggsförändring avseende väggstjocklek.

Det mindre väntade resultatet i denna beräkning är att köldbryggan ökar när mängden isolering ökar, även om ökningen numerärt är väldigt liten. Detta kan förklaras med att minskningen av värmeflödet genom bjälklaget blir mindre än minskningen av värmeflödet genom väggen då köldbryggan är differensen mellan de båda.

8.1.2 Fönster

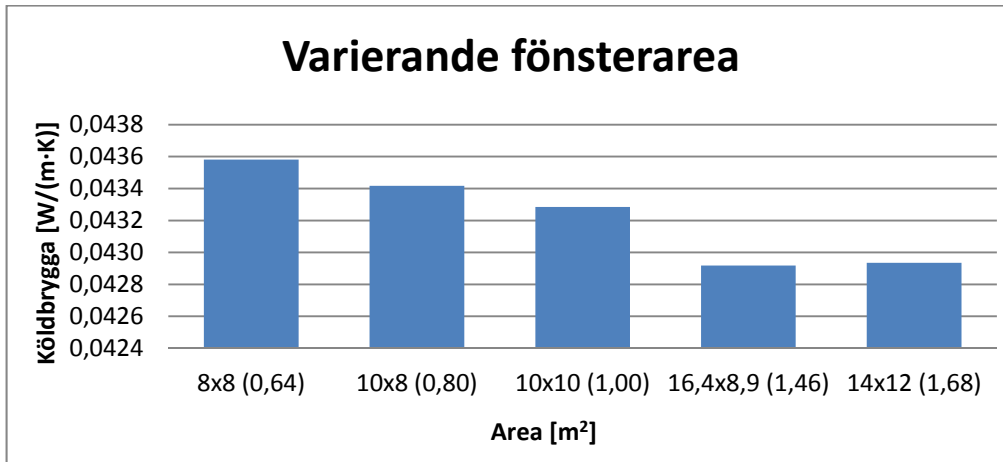
Variert U-värde: En avgörande faktor för transmissionsförlusten genom ett fönster är dess U-värde, men hur U-värdet inverkar på köldbryggan är en intressant jämförelse att göra. Nedan undersöks hur köldbryggan i fönsteranslutningar påverkas av U-värdet på fönstret. Detta utförs genom att i ett fönster med konstant storlek variera glasets och karmens U-värde, så att glasets U-värde förhåller sig linjärt till fönstrets totala U-värde. I figur 8.3 nedan presenteras ett standardfönster från Beckomberga med fem olika U-värden.



Figur 8.3 - Köldbryggsförändring avseende U-värde.

Notera att transmissionsförlusterna förändras med förhållandevis små värden mellan olika U-värden. Det visar sig dock att ett högre U-värde på glasets leder till större transmissionsförluster, och trenden i diagrammet visar på en exponentiell förändring. Ökningen kan förklaras med minskat värmemotstånd, λ , på karm och glas men den exponentiella förändringen kan inte förklaras med detta.

Variерande fönsterarea: En annan jämförelse är att undersöka hur fönsterarean påverkar köldbryggan, som baserar sig på antalet löpmeter fönsterkarm. I figur 8.4 nedan presenteras fönstrets köldbrygga i förhållande till area. I analysen har fönstrets area och form varierats i fem olika utförande medan fönstrets och glasets U-värde samt karmstorleken hålls konstanta. Med sambandet för fönsters area och U-värde i ekvationer 6.5 - 6.12 innebär detta att λ -värdet förändrats för både glas och karm i samtliga tester. Köldbryggan anges som linjeköldbrygga per meter omslutande karm.

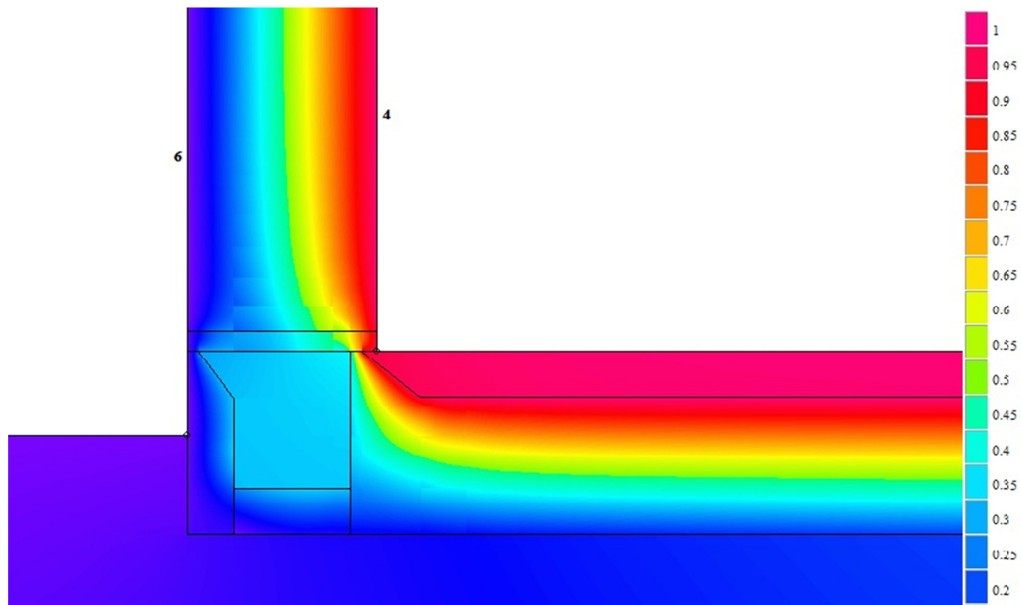


Figur 8.4 - Köldbryggsförändring avseende fönsterstorlek.

Resultatet visar på en minskande transmissionsförlust per meter omslutande längd när fönsterarean ökar. Orsaken är troligen den minskade andelen hörn per löpmeter köldbrygga. I diagrammet kan observeras en avvikelse i sambandet för fönsterstorleken 1640x890 mm², som skulle kunna förklaras av att formen på fönstret avviker från de övriga i beräkningen. Detta innebär troligtvis att även fönstrets form inverkar något på linjeköldbryggan.

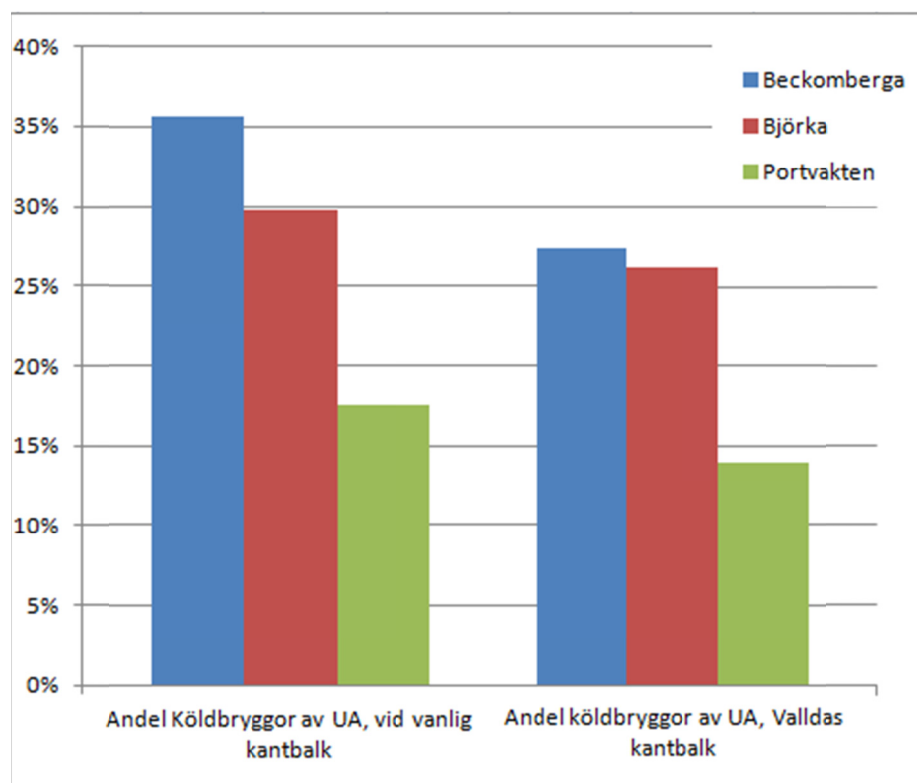
8.1.3 Kantbalk

Ny kantbalk: En intressant analys att utföra är kantbalkens inverkan på den totala andelen transmissionsförluster genom en byggnad. Vallda Hebergs kantbalk är modifierad så att värmeflödet blir mindre och transmissionsförlusterna minskar. I en HEAT2-modellering av kantbalken, se figur 8.5 nedan, kan låga temperaturer i kantbalken observeras till följd av ett mindre värmeflöde.



Figur 8.5 - Vallda Hebergs kantbalk i HEAT2.

Om referensobjekten hade designats med Vallda Hebergs kantbalk hade transmissionsförlusterna kunnat reduceras. I figur 8.6 nedan visas en jämförelse mellan andelen köldbryggor vid de båda kantbalksalternativen för alla tre referensobjekten.



Figur 8.6 - Förändring med Valldas Kantbalk i referensobjekten.

Det kan observeras att för Beckombergas del är inverkan störst, ty kantbalken utgör en stor del av köldbryggorna i byggnaden. Även i Björka utgör kantbalken en stor del, men skillnaden blir mindre i detta fall då transmissionsförlusterna är lägre från början genom Björkas kantbalk. Förändringen i Portvakten blir heller inte så stor trots den ganska stora skillnaden i kantbalksisolering och värmeflöde. Detta beror på att Portvaktens kantbalk utgör en mindre del av de totala köldbryggorna i jämförelse med de andra två referensobjekten. Största förändringen blir för Beckombergas andel köldbryggor av UA som sjunker med 8,2 procentenheter.

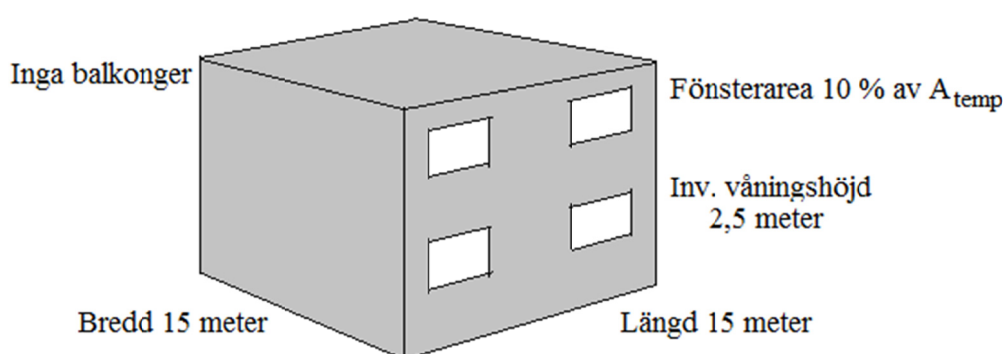
8.2 Andelar köldbryggor – olika hustyper

Hur olika konstruktionsutföranden påverkar köldbryggornas andel är intressant att undersöka. Här representerar de tre referensobjekten Beckomberga, Björka samt Portvakten tre olika typer av stomsystem - *Typritning*, *Klimatvägg* respektive *Massivträ*. Några variationer som är lämpliga att undersöka sambandet för är:

- Formfaktorns inverkan
- Systemtyp och byggnadshöjd
- Fönsterarea och systemtyp

I beräkningarna av referensobjektens andel köldbryggor används samma längder, areor och andelar som använts vid projekteringen. Detta innebär bland annat att referensobjektens andel fönster av A_{temp} skiljer sig från 10-17 %, vilket ger en stor inverkan på andelen köldbryggor från fönster. Det innebär även att kantbalkens procentuella andel av byggnaden varierar stort, då de tre referensobjekten sträcker sig från två till åtta våningsplan. Med detta som bakgrund designas en referensbyggnad med samma andel fönster, areor och våningshöjd mellan stomsystemen.

En referensbyggnad med den invändiga arean 225 m^2 per våning anses representera ett rimligt flerbostadshus som kan varieras i form och fönsterarea, se figur 8.7 nedan. Husgrundens form är kvadratisk, med $15 \times 15 \text{ m}^2$, vilket representerar formen med den minsta omkretsen och därmed lägst transmissionsförluster för den givna arean. Höjden varierar i analyserna, men varje våningsplan har den invändiga höjden 2,5 meter. Fönsterarean antas vara 10 % av A_{temp} , som antas vara en rimlig andel för ett lågenergihus och byggnaden konstrueras utan balkonger för att möjliggöra en rättvis jämförelse mellan systemtyperna. Förutsättningarna för beräkningen av VFT är samma som anges i kapitel 4: Beräkningsmetoder för samtliga systemtyper.



Figur 8.7 - Referensbyggnad.

8.2.1 Standardplattform

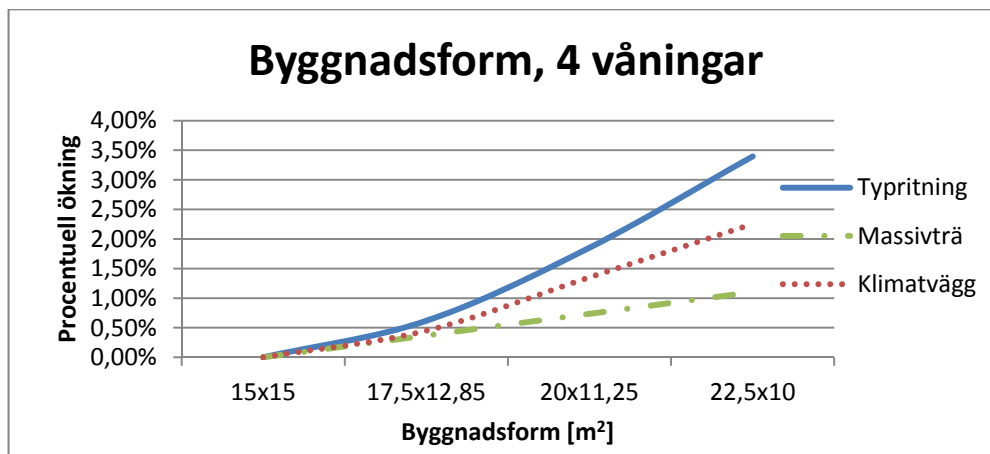
För att få perspektiv på hur köldbryggorna i energieffektiva hus förhåller sig görs en jämförelse med mer standardiserade lösningar. I tabell 8.1 nedan redovisas de framräknade värden som finns för NCC flerbostadshusplattform för vanliga byggnader.

Tabell 8.1 – Sammanställning av värden för köldbryggor från standardplattformen.

Detalj	Ψ
	[W/(m·K)]
Kantbalk	0,16 - 0,25
Kantbalk uppdragen isolering	0,17
Väggkant	-
Fönster	-
Takfot	0,05
Balkong invändig kant	0,12
Bjälklag	0,11
Balkong	0,27

8.2.2 Formfaktorns inverkan

Med ett kvadratisk hus som utgångspunkt innebär det att transmissionsförlusterna ökar om formen ändras. Golvarean hålls konstant och en analys av hur mycket köldbryggorna ökar vid olika byggnadsformer utförs, se figur 8.8. När byggnadsformen förändras från kvadratisk ökar både UA och köldbryggornas transmissionsförluster vilket innebär att andelen köldbryggor inte nödvändigtvis måste öka.

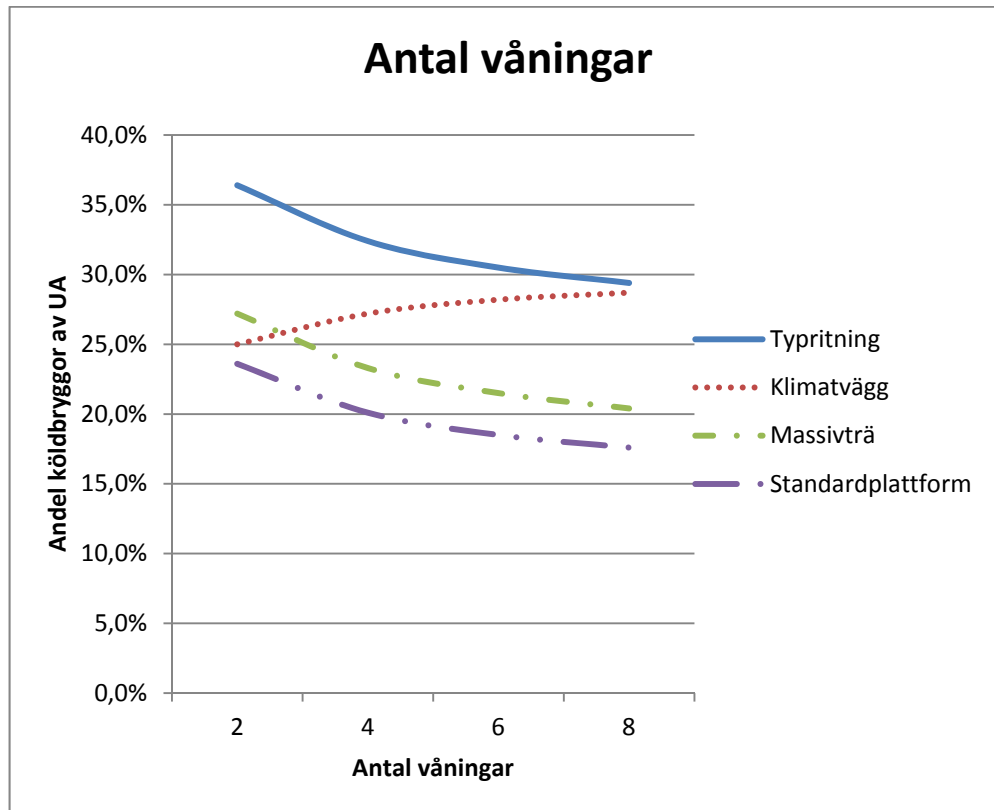


Figur 8.8 - Byggnadsformens inverkan på andelen köldbryggor.

Analysen visade att andelen köldbryggor av UA ökar med maximalt en procentenhet för valda längder i en fyrvåningsbyggnad, vilket motsvarar en ökning av transmissionsförluster genom köldbryggorna på cirka 3,5 %. I figuren kan utläsas att transmissionsförluster genom köldbryggor ökar olika beroende på systemtyp, där typritningarna visar sig ge störst ökning av transmissionsförluster, vilket kan förklaras med att denna har störst värmeflöde genom kantbalken. För rektangulära byggnader bör särskilt kantbalken, bjälklagskant och takkant beaktas. När byggnadsformen ändras från kvadratisk till rektangulär så ökar dessa till skillnad från övriga köldbryggor som procentuellt sett bör minska. Då UA också ökar med förändrad form borde andelen köldbryggor fortfarande vara ungefär densamma. Andelen transmissionsförluster av UA beror därmed på byggnadsformen och är alltså inte alltid ett representabelt sätt att räkna med.

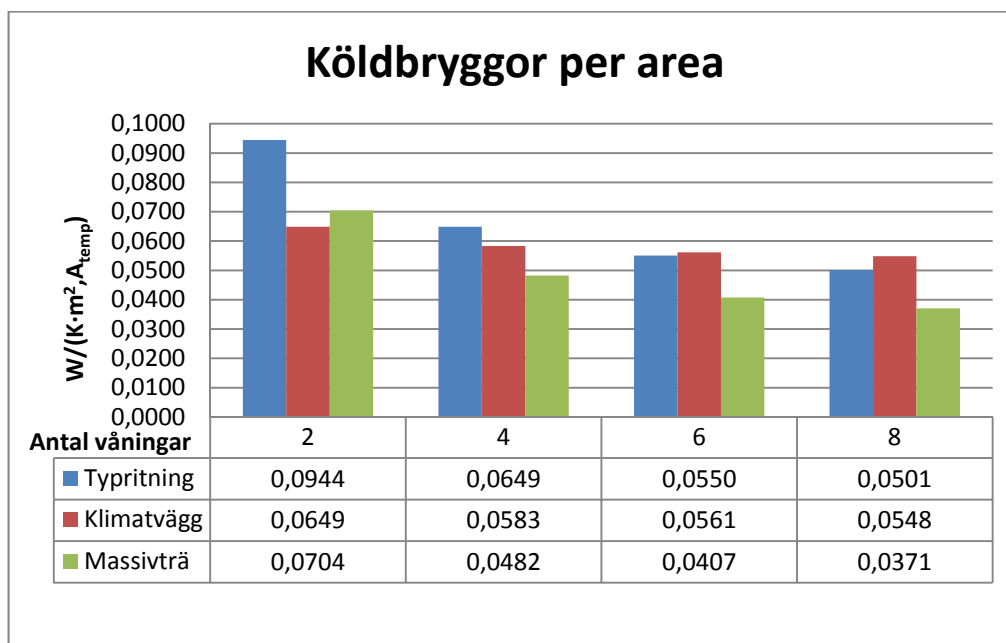
8.2.3 Systemtyp och byggnadshöjd

Våningshöjdens inverkan har betydelse för andelen köldbryggor, då inverkan av kantbalk och byggnadshörn blir mindre med fler våningsplan. Byggnadens totala transmissionsförluster skulle då öka med antalet extra fönster och bjälklag, vilket innebär att andelen köldbryggor minskar till följd av mindre andel kantbalk. De tre olika stomsystemen och standardritningen varierar i våningsantal och presenteras i figur 8.9 nedan.



Figur 8.9 - Förändring av andel köldbryggor avseende systemtyp och antal våningar.

I diagrammet 8.9 ovan sjunker andelen köldbryggor i samtliga systemtyper utom för Klimatväggen som ökar. Minskningen beror på att de totala transmissionsförlusterna genom UA ökar snabbare än köldbryggornas transmissionsförluster. Kurvornas form beror på att kantbalken inverkar mer på byggnader med få våningar. I fallet med Klimatväggen visar det sig att köldbryggorna ökar mer än transmissionsförluster genom UA. Detta kan förklaras med den bättre isolerade kantbalken som har ett lägre värmeflöde, men även att övriga köldbryggor i denna konstruktion har högre värmeflöden än i typritningskonstruktionen och massivträbyggnaden.

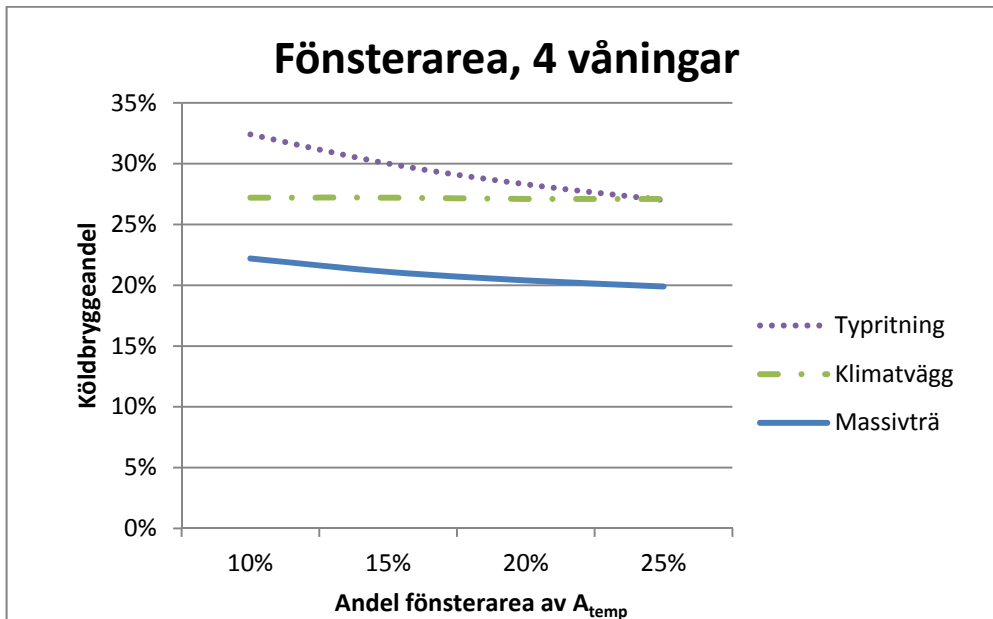


Figur 8.10 - Förändring av värmefflöde avseende systemtyp och våningshöjd.

I figur 8.10 ovan har systemtypernas köldbryggor delats med arean A_{temp} för antalet våningar i respektive fall. Skillnaden i detta fall blir att alla byggnadssystemens köldbryggor minskar i förhållande till A_{temp} . För typritningen och massivträkonstruktionen blir förändringen störst i början, då kantbalken utgör stor andel av köldbryggorna. För Klimatväggen blir förändringen mer linjärt avtagande. Detta visar på svårigheter att använda andel köldbryggor av UA som ett sätt att beskriva byggnadens transmissionsförluster genom köldbryggor.

8.2.4 Fönsterarea och systemtyp

Utöver kantbalken har fönsteranslutningarna visat på höga värden för köldbryggorna. För att kunna göra en lämplig jämförelse sätts fönsterarean och fönsterstorleken till samma i alla stomsystem. I figur 8.11 varierar fönsterarean mellan 10 och 25 % i en fyra våningar hög byggnad av olika system. Notera att en ökad fönsterarea ger ett högre genomsnittligt U-värde i klimatskalet, vilket innebär att andelen köldbryggor bör minska. Värmeförlusttalet, å andra sidan, bör öka.



Figur 8.11 - Köldbryggsförändring avseende fönsterarea.

Diagrammet ovan visar på svårigheterna med att använda procentsatser som en metod att bedöma köldbryggornas transmissionsförluster. För Klimatväggs konstruktion blir förändringen knappt märkbar och kan förklaras med att UA blir högre när andelen fönster ökar, samtidigt som fönstrens totala transmissionsförluster genom köldbryggor ökar. Detta innebär att den relativa förändringen i andel köldbryggor blir liten och orepresentabel.

8.3 Jämförelse av resultat

För att få en uppfattning om hur de beräknade köldbryggorna förhåller sig till andra beräkningar görs en jämförelse med beräkningar från tre materialtillverkare. I tabell 8.2 nedan jämförs intervallen på köldbryggors transmissionsförluster i referensobjekten med Swedisols, Isovers och Gyprocs beräkningar för träregelvägg och stålregelvägg. Dessa konstruktionstyper bör liknas vid Beckombergas konstruktion.

Tabell 8.2 – Jämförelse av värden för köldbryggor.

Linje- köldbrygga Systemtyp	Referensobjekt	Swedisol ¹	Isover ²	Gyproc ³
	[W/(m ² ·K)]	[W/(m ² ·K)]	[W/(m ² ·K)]	[W/(m ² ·K)]
	Varierande	Träregelvägg	Träregelvägg	Stålregelvägg
Balkong	0,160 -0,250	-	-	-
Kantbalk	0,151 -0,395	-	0,050-0,230 (λ=2,0)	0,060-0,130 (λ=okänt)
-				
Fönster & dörr	0,043 -0,079	-	0,020	0,044-0,072
Bjälklagskant	0,029 -0,107	0,020-0,040	0,020-0,030	0,107-0,260
Väggkant	0,025 -0,057	0,030-0,060	-	0,028
Takkant	0,014 -0,091	0,015-0,030	0,020-0,070	-
Mellanvägg	0,027	-	-	0,107-0,260
Punktformig- köldbrygga	Referensobjekt			
	[W/K]			
Systemtyp	Varierande			
Golvhorn	0,032 -0,128	-	-	-
Takhörn	0,004 -0,046	-	-	-
Bjälklagshörn	0,004 -0,033	-	-	-

I tabellen kan flera liknelser, men även en del avvikelser observeras. Värmeflödet genom kantbalk skiljer sig förhållandevis mycket, där endast de högsta värdena kan motsvara de framräknade transmissionsförlusterna i referensobjekten. Här kan avvikelser i beräkningsmetoder misstänkas men även oklarheter i vilken marktyp som används eller hur stor den fria höjden mellan mark och fasad är. Mellanväggen skiljer sig mycket från Gyprocs beräkning, men konstruktionen skiljer sig stort, då endast Björkas Klimatvägg beräknats i denna rapport. En annan observation är avsaknaden av punktköldbryggor såsom hörn, vilka kan få viss betydelse för byggnader med många hörn i förhållande till UA.

9. Diskussion

I detta kapitel diskuteras ett antal slutsatser som dragits från de resultat som framkommit tidigare i rapporten. Även sådant som uppmärksammats under arbetets gång och som skulle behöva undersökas djupare diskuteras.

9.1 Beräkningsresultat från referensobjekt

Köldbryggornas transmissionsförluster varierar mycket beroende på konstruktionstyp vilket bevisar att det är svårt att generalisera köldbryggor. Det är emellertid praktiskt att ha riktvärden att luta sig mot för att kunna kontrollera resultaten i de egna effektbehovsberäkningarna. I projekt där värmeflödesberäkningar inte kan utföras för varje detalj skulle möjligen schablonvärden kunna användas, men det innebär en stor osäkerhet i resultaten.

Det kan konstateras att i alla referensobjekt är kantbalken den köldbrygga som har störst transmissionsförluster per löpmeter. Gemensamt är även att fönsteranslutningarna är köldbryggan som utgör störst andel av transmissionsförlusterna efter hänsyn tagits till omslutningslängder och mått.

Portvakten ger förhållandevis låg andel köldbryggor av UA, med 17,5 %. Detta förklaras delvis med att det är ett åttavåningshus vilket gör att kantbalken, som är köldbryggan med störst värmeflöde, utgör en mindre andel än för lägre byggnader. För Björka och Beckomberga som har färre våningar blir andelen köldbryggor större för att kantbalken utgör en större andel av byggnadernas köldbryggor. Konstruktionen i Portvakten har förutom en liten andel kantbalk i förhållande till A_{temp} , generellt bra anslutningar där isoleringen i klimatskalet sällan bryts. Kanter och hörnor ger därmed lägre värmeflöden än motsvarande konstruktioner i de andra referensobjekten.

Ur värmeflödessynpunkt lämpar sig de tre referensobjekten för byggnader av olika antal våningar, sett andel köldbryggor av UA. Detta beror främst på vilka köldbryggor som får störst genomslag av den totala andelen köldbryggor. I Beckomberga och Portvakten är kantbalken en konstruktion med mindre isolering än i Björka vilket orsakar ett stort värmeflöde genom det nedre planet. Dock har byggnaderna i övrigt en bättre konstruktion avseende transmissionsförluster, vilket gör att ju högre byggnaderna är, desto mindre blir andelen köldbryggor. I Björka är sambandet det motsatta, då väggarnas anslutningar leder till större värmeförluster än i de övriga referensobjekten ökar andelen köldbryggor med höjden på byggnaden. Detta gäller för byggnader av de tre olika systemtyperna men samma våningsantal och invändiga mått.

9.1.1 Detaljer i referensobjekten

Balkong: Balkonger ger ett förhållandevis stort värmefflöde per meter vilket gör att balkonger infästa längs stommen bör väljas bort till förmån för fristående konstruktioner ur värmesynpunkt. I Björka undviks köldbryggorna vid balkongen genom att sätta hela konstruktionen som en fristående plattform på pelare. Detta kan vara konstruktionsmässigt svårt att utföra för högre byggnader och påverkar även estetiken. I Portvakten har balkongernas köldbryggor reducerats avsevärt till enbart små infästningar, då balkongerna hänger från väggen i vajrar.

Kantbalk: Kantbalken har visat sig vara köldbryggan med störst transmissionsförluster per löpmeter. Trots att konstruktionen i Björka gav låga temperaturer vid termograferingen och temperaturberäkningen är denna kantbalk den mest isolerade av de olika typerna som undersökts i de tre referensobjekten. Det hade därför varit intressant att utföra termografering och temperaturberäkningar på de andra referensobjekten för att se hur dessa förhåller sig till varandra.

Konstruktionen i Vallda Heberg åtgärdar problemet med ett stort värmefflöde och linjeköldbryggan blir 0,0754 W/(m·K). Denna konstruktion kan lämpa sig väl i de tre undersöka referensobjekten, ur ett värmetekniskt perspektiv.

Väggar: Beckomberga visade sig ha lägst värden för väggkantskonstruktionen, vilket tyder på att denna konstruktion har ett högt värmemotstånd. Värmefflödet genom denna väggtyp beror dels på isoleringens tjocklek och dels på pelarens storlek och placering. Med typritningens tjockaste isoleringsalternativ och en pelare som placeras invändigt skulle konstruktionen uppnå det bästa värmemotståndet.

Konstruktionen i Portvakten, med sitt klimatskal av massivträ som inte bryter isolerskikten har näst lägst värmefflöde. Undantaget i Portvakten är kanten på betongväggen i plan ett som har störst värmefflöde bland väggkonstruktionerna. Generellt blev köldbryggan större för Björka, då betongpelare bryter isoleringen längs kanterna i större utsträckning än i de andra referensobjekten.

Hörn: En möjlig diskussion kring hanterandet av hörn i energiberäkningar är att de invändiga hörnen skulle kunna "kvittas" mot utvändiga hörn, så att varken invändiga eller utvändiga hörn behöver beräknas. De låga värmefflöden som hörnen ger upphov till innebär att inverkan på transmissionsförlusterna är låg, samtidigt som de invändiga hörnen bidrar till lägre transmissionsförluster, då de har mer isolering per invändig längd än omgivande ytor. För att dra en sådan slutsats skulle dock fler beräkningar behöva utföras på olika typer av byggnadssystem.

Mellanväggar: Av de undersökta referensobjekten är det endast Björka som har mellanväggar som bryter klimatskalet. Bjälklagskonstruktionen påminner till stor del om mellanväggskonstruktionen och en jämförelse med bjälklagsanslutningen skulle kunna vara lämplig. I en sådan jämförelse är linjeköldbryggan förhållandevis låg, då Björkas bjälklagsanslutning har runt fyra gånger så stort värmefflöde per meter.

Bjälklag: Beroende på stomsystem varierar köldbryggan i bjälklaget ganska mycket. För Portvakten blev köldbryggorna i bjälklaget små då massivträ från bjälklaget monteras mot massivträet i väggen och endast bultar och geometriska effekter påverkar köldbryggan. Beckomberga och Björka har istället anslutningar med betongbjälklag där värmefflödet blir större.

Analysen av olika tjocklekar på isoleringsskiktet i en vägg från typritningen visade att köldbryggan ökar när väggen blir tjockare. Då köldbryggan är skillnaden mellan värmefflöde med och utan den extra detaljen ökar köldbryggan när värmefflödet genom väggen blir mindre. Mer uppenbart är att tjockare bjälklag ger ett större värmefflöde och är alltså en större köldbrygga.

Tak: Det visade sig att köldbryggorna i Beckombergas takkant och takhorn har något högre värmefflöde än de övriga referensobjekten. Det skall dock nämnas att i modelleringen har hänsyn inte tagits till isoleringens triangulära form, där den blir tjockare längre in längs byggnaden. Med hänsyn till detta skulle värmefflödet kanske bli något lägre. Takkanten i Björka visade sig ha lägst värmefflöde, med en konstruktion där lösull ligger på ett uppreglat tak och fasaden sträcker sig upp längs med isoleringsskiktet. Takhörnet hade däremot lägst värmefflöde i Portvakten, då konstruktionen i princip består av 500 mm obruten isolering under ett sadeltak.

Fönster: En faktor som ofta diskuteras är hur stor andel fönster som bör finnas i en byggnad. Ibland räknas fönsterarean som andel av A_{temp} , ibland som andel av fasadens yta. Oftast är en stor andel fönster att eftersträva om till exempel miljöcertifiering skall uppnås, där dagsljusinsläppet är viktigt utvärderingspunkt, för att få en god dagsljusmiljö inomhus. I miljöcertifieringsprogrammen, exempelvis *Miljöbyggnad*, ställs oftast höga krav på fönsterytor ur effektbehovssynpunkt (Boverket, 2010). Detta kan leda till en konflikt mellan miljö och energicertifiering, som gör att byggherrar ibland måste välja bort ett av alternativen. Ett bättre alternativ hade kanske varit att sammanväga fönsters energi- och komfortegenskaper i båda beräkningarna.

I examensarbetet *Utvecklingen för passivhus i Sverige*, har den optimala fönsterplaceringen i Portvakten undersökts ur värmesynpunkt. Med de tjocka väggar som oftast förekommer i lågenergihus är det fördelaktigt att placera fönstret långt ut vid fasadskiktet då ljusinsläppet blir störst. De invändiga hörnen kan även fasas av för att ge bättre ljusinsläpp. Ur energisynpunkt bör fönstret placeras mitt i fönsterhålet och vid placering längst in skulle de värsta köldbryggorna uppstå. Att placera fönstret

längst ut kan vara olämpligt då tätning och isolering är svårt att utföra med en ventilerad luftspalt.

Då karmen är den delen med störst transmissionsförlust i fönsterkonstruktionen skulle man kunna argumentera för att ha få stora fönster hellre än många små om arean skall vara densamma. Alternativet är karmlösa fönster, men dessa har nackdelen att de inte är öppningsbara och kräver en annan typ av infästning.

9.2 Känslighetsanalys & förbättringspotential

I analyskapitlet varierar olika modeller för att undersöka hur materialplaceringar och val av materialtyp påverkar olika konstruktionsdelar. Med enkla förändringar av modeller kan man ta fram nya lösningar som teoretiskt ger mindre transmissionsförluster. Notera att faktorer som fukt och lufttäthet även bör kontrolleras.

I projektet Vallda Hedberg har särskilt kantbalken beaktats för att reducera värmeflödet i köldbryggorna. Kantbalken har ett extra isolerskikt och mer isolering än kantbalkarna i referensobjekten.

För att visa på hur förbättringar kan göras, testades några enkla metoder för att reducera värmeflödet genom några valda detaljer. Några slutsatser efter modelleringarna är:

- Ökad bjälklagstjocklek och ökad väggstjocklek ger större andel köldbryggor av UA.
- Små fönster har större transmissionsförluster genom köldbryggor än stora fönster. Transmissionsförlusterna genom köldbryggorna i fönsteranslutningen ökar när fönstrets U-värde ökar.
- Användningen av Vallda Hebergs kantbalk i referensobjekten sänker andelen köldbryggor av UA med mellan 3,5 och 8,2 procentenheter.
- Klimatväggen visade inte på någon förändring i andel köldbryggor när fönsterarean ändrades. Detta beror troligen på att UA ökar med motsvarande andel som transmissionsförlusterna genom köldbryggorna.
- Klimatväggen är den enda konstruktionen där andelen köldbryggor ökar med våningsantalet.

Förändringen med Vallda Hebergs kantbalk visar på osäkerheten med att använda andel köldbryggor som ett mätvärde, då procentsatsen inte anger de faktiska transmissionsförlusterna. Köldbryggorna i Klimatväggens anslutningar motsvarar i princip köldbryggan som uppstår vid större andel fönster. För de andra referensobjekten var sambandet det motsatta. Klimatväggens andel köldbryggor ökade även med antalet våningar vilket visar på att dess kantbalk i förhållande till dess övriga konstruktion har låga transmissionsförluster, när dessa jämförs med de andra referensobjekten.

9.3 Termografering

Termograferingen på Björka visade på temperaturer som var nära de teoretiska. Detta visar på att termografering borde kunna användas som en metod att verifiera värmeflödet med hjälp av beräknade temperaturer.

Det kan antas att avvikelser om någon grad Celsius från det teoretiska resultatet är inom felmarginalen för modelleringen och termograferingen. I de flesta fall var avvikelserna endast någon grad Celsius och temperaturer var alltid lägst invid hörn med en stigande temperatur mot mitten av väggen. Det bör noteras att temperaturfallet, $\Delta T_{\text{inne-ute}}$ genom väggen var förhållandevis stort vid mättillfället med nästan 30 °C. Det skall också nämnas att det inte var den lägsta temperaturen under året och att temperaturen i denna typ av konstruktion därmed kan bli låg vid kanter och hörn under vinterhalvåret. Med detta i åtanke bör det ställas högre krav på kantbalkar.

9.4 Osäkerheter i underlag & HEAT

Underlaget från referensobjekten visar ibland på vissa otydligheter och några ritningar saknar måttsättning. I dessa fall har en uppskattning gjorts av måtten vilket innebär viss osäkerhet i jämförelserna. Dessa antaganden har dokumenterats för att göra det möjligt att återskapa de resultat som presenterats i rapporten.

Vid HEAT-modellering kan det vara svårt att veta exakt var symmetrilinjerna finns och två meter har visat sig vara ett rimligt avstånd från köldbryggorna. Vid de undersökningar som gjorts i denna rapport har i vissa fall stora förändringar av köldbryggor uppstått när symmetrilinjerna antagits på olika avstånd från själva köldbryggan. Valet av symmetrilinje är en avvägning mot antalet celler som kan modelleras i programmet och visar på att resultatet är väldigt beroende av rätt indata.

Det finns flera alternativ på hur byggnadsdelar och köldbryggor ska modelleras i HEAT samt var gränsen för köldbrygga och byggnadsdel går. Underskattas köldbryggorna finns det risk att de krav som ställs på transmissionsförlusterna inte uppfylls vid mätning eller verifiering. Men det kan i sin tur leda till större kostnader i onödan för att köldbryggorna överskattats och att det då krävs bättre lösningar på byggnadsdelarna, än vad som krävs för att uppnå kraven. Det blir en balansgång mellan kostnader i projekteringsskedet och brukarens kostnader i förvaltningsskedet.

9.5 Framtiden – 10-års perspektiv

Inom det närmaste decenniet är det troligt att BBR-kraven för energianvändning skärps ytterligare. På de år som gått mellan FEBY 09 och 12 har bland annat kravet på U-värden för fönster ändrats från 0,9 till 0,8 W/(m²·K) och kraven på eluppvärmda hus skärpts. Men exakt hur kraven kommer se ut i framtiden är omöjligt att veta idag. För att nå de ökade kraven krävs en medvetenhet om köldbryggornas inverkan på effektbehovet och hur andelen köldbryggor av UA ökar när klimatskalets U-värde sjunker.

En möjlig diskussion som kan bli aktuell i framtiden är kundens syn på de olika nivåerna av passivhusmärkning. Kunden är i huvudsak intresserad av ett verifierat passivhus där denne vet att energianvändningen är låg, men marknadens kännedom om de olika märkningarna kan leda till att projekt som projekterats som lågenergihus aldrig uppnår kraven i verkligheten. Att ha för stort utbud av certifieringar kan dessutom leda till förvirring och komplicera för marknadens aktörer.

9.6 Generalisering via procentsatser

En intressant frågeställning är; när bör köldbryggor beräknas individuellt och när kan dessa försummas eller uppskattas. Det är inte helt enkelt att dra gränser för när det är rimligt att beräkna en viss detalj eller inte. Men denna rapport visar på vikten av att beräkna köldbryggor, då variationen mellan olika köldbryggor är stor.

En annan metod hade varit en generalisering av värmeförluster genom köldbryggorna, i form av procentuella eller absoluta värden på köldbryggor. För att kunna göra detta krävs ett större statistiskt underlag och en större variation av detaljlösningar än vad som har undersökts i denna rapport. Då andelen köldbryggor är beroende av systemtyp och byggnadsform hade en lämplig metod kunnat vara avläsning i en matris som beror på de vanligaste variationerna.

9.7 Kravspecifikationer

BBR:s metod att beräkna U-medelvärde innebär att konstruktionsdelar med bra U-värden kan väga upp för konstruktionsdelar med dåligt U-värde. En alternativ metod hade varit enskilda krav för konstruktionsdelar eftersom dåliga konstruktionslösningar ger upphov till låga temperaturer med följdproblem avseende fukt och komfort. Även om en beräkning av ett U-medelvärde används bör det ställas krav på individuella konstruktionsdetaljers transmissionsförluster som görs i flera utländska standarder.

En internationell standardisering av beräkningsmetoderna hade varit att föredra, men med individuella krav då klimatet skiljer sig mycket mellan världens länder. Exempelvis beräknas byggnadens omslutande area på olika sätt om man går efter de svenska eller de tyska beräkningssätten. Detta gör att transmissionsförluster genom köldbryggor enligt den svenska modellen blir större, då den extra utvändiga arean blir en del av köldbryggan.

En annan anmärkningsvärd skillnad är tydligheterna i kravspecifikationer där riktvärden oftast anges per area eller längdenhet. Till exempel har det mellan FEBY:s utgåvor gjorts förändringar från BOA till A_{temp} vilket kan leda till viss förvirring.

9.8 Förslag på framtida utredningar

Några resultat och slutsatser har skapat fler frågeställningar under arbetets gång. Dessa slutsatser skulle kunna utgöra grunden till framtida utredningar eller examensarbeten. Nedan spaltas några tänkbara frågeställningar upp:

- Vilken storhet är lämpligast att använda vid energiberäkningar? Förslaget i denna rapport om att använda $W/(K \cdot m^2, A_{temp})$ kan utvärderas och andra möjligheter kan undersökas.
- Vilka parametrar i HEAT ger de mest trovärdiga resultaten? Verifieringar med mätningar skulle kunna göras.
- Hur skulle schablonvärden för värmeflöden genom köldbryggor se ut för olika systemtyper? Kan dessa grupperas för att minska spridningen i andel av totala transmissionsförluster.
- Hur kan en kantbalk konstrueras för bästa konstruktionsmässiga egenskaper? Värmefflöde, fukt och konstruktion kan vara viktiga parametrar.
- Går det att förbättra fönsteranslutningarna? Hur utformas fönsteranslutningarna på bästa sätt och vilken effekt har karmens design?
- Hur stor inverkan har punktköldbryggor för olika byggnadstyper? Kan dessa försummas eller bör de alltid beräknas?
- Analysera detaljer ur kostnads- och fuktmässiga aspekter.

10. Slutsats

Rapportens första syfte var att undersöka värmeflöden genom köldbryggor i tre referensobjekt. Resultatet blev att de individuella köldbryggorna kan variera stort beroende på typ av köldbrygga och vilken byggnadstyp de tillhör. I alla undersökta referensobjekt visade sig kantbalken ha det största värmeflödet med värden från cirka 0,150 till 0,400 W/(m·K). För övriga köldbryggor var variationen stor med värden som var nära noll och upp till cirka 0,130 W/(m·K). Av tre undersökta referensobjekt visade sig konstruktionen av sandwichelement ge störst värmeförluster genom köldbryggor men konstruktionen med stålstomme gav störst andel köldbryggor av de totala transmissionsförlusterna. Fönsteranslutningar visade sig generellt utgöra en stor andel av köldbryggorna i alla referensobjekten.

En annan del av rapporten analyserade vilka konstruktionsmässiga parametrar som påverkar värmeflödet genom ett urval av de beräknade köldbryggorna. De lämpligaste detaljerna att studera var fönster som utgör en stor andel av köldbryggorna och kantbalk som är den köldbrygga med störst värmeförlust per meter. Fönsteranslutningens köldbrygga visade sig minska med större fönsterstorlek men öka med högre U-värde på fönstret. En mer isolerad kantbalk från ett befintligt projekt jämfördes mot kantbalkarna i referensobjekten och som bäst kunde andelen köldbryggor reduceras med 8,2 procentenheter när den nya kantbalken användes i referensobjekten.

Lämpligheten att använda ett schablonvärde vid beräkning av köldbryggor anses efter undersökningarna i denna rapport vara olämpligt. Exempelvis visade det sig att byggnaden med störst totala transmissionsförluster genom köldbryggor inte hade den största andelen köldbryggor av totala transmissionsförluster. Ett annat exempel är att två av referensobjekten hade liknande värmeförlusttal, VFT, med cirka 10 W/K men andelen köldbryggor av de totala transmissionsförlusterna var 17,5 respektive 35,6 %. Om en schablon används för lågenergihus bör denna vara hög, runt 35-40 % av UA, vilket skulle innebära en "överdimensionering" för många konstruktioner med ökade materialkostnader som konsekvens. Dessutom skulle en undersökning med ett brett statistiskt underlag behöva utföras för att omfatta de vanligaste konstruktionstyperna.

Andra slutsatser som dragits är att kravspecifikationer som BBR och för varumärket Passivhus hade kunnat ställa energikrav på enskilda köldbryggor, som flera utländska kravspecifikationer gör. BBR:s krav på ett genomsnittligt U-värde främjar inte utvecklingen av bättre detaljlösningar ur energisynpunkt, även om byggnaders klimatskal blir effektivare.

11. Referenser

11.1 Tryckta källor

- Abel, E. & Elmroth, A. (2008): *Byggnaden som system*, ISBN: 978-91-540-6020-7
- Asimakidis, C. & Högberg, R. (2010): *Flerbostadshus med plusenergiteknik: En jämförelse mellan installationstekniska lösningar med hänsyn till energibalans och livscykelkostnad*, ISRN LUTVDG/TVBH--10/5061--SE(76).
- Boverket (2011a): *Boverkets författningssamling, BBR 18 BFS 2011:6*.
- Boverket (2011b): *Boverkets författningssamling, BBR 19 BFS 2011:26*.
- Bagge, H., Elmroth, A. & Lindström, L. (2004): *Energianvändning och inneklimat i två energieffektiva småhus i Västra Hamnen i Malmö*. ISSN 0349-4950
- Elmroth, A (2007): *Energihushållning och värmeisolering*, Svensk byggtjänst.
- Fredlund, S. & Ranevi, C. (2010): *Utvecklingen för passivhus i Sverige: - med fokus på flerbostadshus av massivträ*, ISRN LUTVDG/TVBH--10/5063--SE(188)
- Goufeng, M. (1997): *Thermal bridges, efficient models for energy analysis in buildings*, KTH, ISSN 0346-5918
- Nevander, L.E. & Elmarsson, B. (1994), *Fukthandbok – praktik och teori*, Svensk Byggtjänst AB, Tredje utgåvan.
- Nyberg, H. (2011): *Thermal bridges at foundations: Evaluation of heat calculation methods*, Master's Thesis in the Master's Programme Structural Engineering and Building Performance Design, Chalmers, Göteborg

11.2 Elektroniska källor

- Boverket (2010): *Miljöklassad byggnad, Manual för ny/projekterad byggnad*, Utgåva version 2.0 2010, Intresseföreningen Miljöklassad Byggnads Tekniska råd, http://www.boverket.se/Global/Webbokhandel/Dokument/2010/Miljoklassning_byggnad.pdf [2012-05-04]
- Cepheus (2012): *Cost Efficient Passive Houses as European Standards*, <http://www.cepheus.de/eng/> [2012-01-19]
- Forum för energieffektiva byggnader (2009a): *FEBY 09: Kravspecifikation för passivhus*, Forum för energieffektiva byggnader, http://www.passivhuscentrum.se/sites/default/files/svensk_kravspecifikation_for_passivhus_0.pdf [2012-01-19]
- Forum för energieffektiva byggnader (2009b): *FEBY: Kriteriejämförelse av Passivhus enligt PHI och FEBY*, <http://www.energieffektivabyggnader.se/download/18.764bd915124e8f2573d800044>

[68/A1731+Kriteriej%C3%A4mf%C3%B6relse+PHI+och+FEBY_23+Nov+2009.pdf](#)
[2012-01-19]

Forum för energieffektiva byggnader (2012): *FEBY 12, Kravspecifikation för nollenergihus, passivhus och minienergihus, Bostäder, Sveriges Centrum för Nollenergihus*, <http://www.nollhus.se/dokument/Kravspecifikation%20FEBY12%20-%20bostäder%20jan.pdf> [2012-02-01]

Halfen (2012): http://www.halfen.se/t/116_7683.html [2012-02-01]

Statens energimyndighet (2010): *Uppdrag 13: Nationell strategi för lågenergibyggnader ER2010:39*,
<http://energimyndigheten.se/PageFiles/17865/Nationell%20strategi%20f%C3%B6r%20l%C3%A5genergibyggnader.pdf> [2012-01-19]

Rockwool (2011): *Kyotopyramiden*,
<http://www.rockwool.se/r%C3%A5d+och+anvisningar/din+bbr-guide/s%C3%A5+h%C3%A4r+bygger+du+energieffektivt> [2012-02-06]

PEP (2012): *Promotion of European Passive houses*,
http://erg.ucd.ie/pep/pdf/Passive_House_Sol_English.pdf [2012-01-31]

PHIUS (2012): *Passive house institute US*,
<http://www.passivehouse.us/passiveHouse/PassiveHouseInfo.html> [2012-01-31]

Swedisol (2012): *Beräkningsmetod köldbryggor*,
<http://rw-swedisol1.inforce.dk/sw1010.asp> [2012-01-31]

Sveby (2012): *Standardisera och verifiera energiprestanda i byggnader*,
http://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/01/brukarindata_bostader.pdf [2012-02-08]

Isover (2007): *Isoverboken*, <http://staffwww.itn.liu.se/~majta/BBR-Ny%20norm.pdf>
[2012-04-16]

Johansson, C. (2009): *Passivhus Norden, Göteborg, Sverige, NCCs erfarenheter av passivhusproduktion*. [2012-01-19]
http://www.energikontoret.z.se/sites/energikontoret.z.se/files/Johansson%20-%20NCCs%20erfarenheter%20av%20passivhusproduktion_0.pdf

11.3 Figurer

Beckomberga (figur 5.1, sidan 40): <http://tresson.se/wp-content/uploads/2010/12/Featured-image-passiv-Beckomberga-22.jpg> [2012-02-08]

Portvakten (figur 5.4, sidan 43):
<http://www.hyresbostaderivaxjo.se/VaraOmraden/Familjeboende/Sigfridsomraadet/Portvakten-Soeder.aspx> [2012-03-20]

12. Bilaga – Beräkningar

En mer ingående beskrivning av beräkningarna som gjorts presenteras i denna bilaga. I bilagan förekommer förkortningarna av referensfall och beräkningsmodell som "ref" respektive "ber".

Beräkningar för HEAT-analyser

Beräkningsvärden för typritningar redovisas i tabellerna nedan. Luftspalt simuleras med samma övergångsmotstånd för luften som inomhus. För olika väggar anges tjockleken på det mellersta isolerskicket med xx framför tjockleken i mm.

Allmänt

Tabell 12.1 – Vägg med olika ytmaterial.

Flöde genom del (1m ²)	q_{ber} [W/(m ² ·K)]	Program
Vägg - puts		
(xx120)	0,1134	HEAT2
(xx120)	0,1134	HEAT3
(xx145)	0,1052	HEAT2
(xx195), Beckomberga	0,0918	HEAT2
Vägg - skalmur		
(xx120)	0,1332	HEAT2
(xx145)	0,1233	HEAT2
(xx195)	0,1053	HEAT2

Tabell 12.2 – Resultat från test av symmetrilinjer.

Avstånd till symmetrilinje, Hörn	q_{ber} [W/(m ² ·K)]	q_{ref} [W/(m ² ·K)]	Ψ [W/(m·K)]
0,5 m	0,1177	1 · 0,0918	0,0259
1,0 m	0,2093	2 · 0,0918	0,0257
1,5 m	0,3008	3 · 0,0918	0,0254
2,0 m	0,3925	4 · 0,0918	0,0253

Tabell 12.3 – Inverkan av antal celler.

Cellindelning [Antal celler]	q_{ber} [W/(m ² ·K)]	q_{ref} [W/(m ² ·K)]	Ψ [W/(m·K)]
Väggkant HEAT2			
50	0,3922	0,3672	0,0250
100	0,3925	0,3672	0,0253
200	0,3929	0,3672	0,0257
2000	0,3946	0,3672	0,0274
Takhörn HEAT3			
20	1,1249	1,0841	0,0259
60	1,1427	1,0965	0,0257
100	1,1482	1,1001	0,0254
130	1,1501	1,1016	0,0253
Takkant HEAT2			
50	0,4433	0,3536	0,0897
100	0,4452	0,3540	0,0912
200	0,4458	0,3542	0,0916
2000	0,4464	0,3544	0,0920

Vägg och väggkant

Tabell 12.4 – Jämförelse HEAT2 & HEAT3

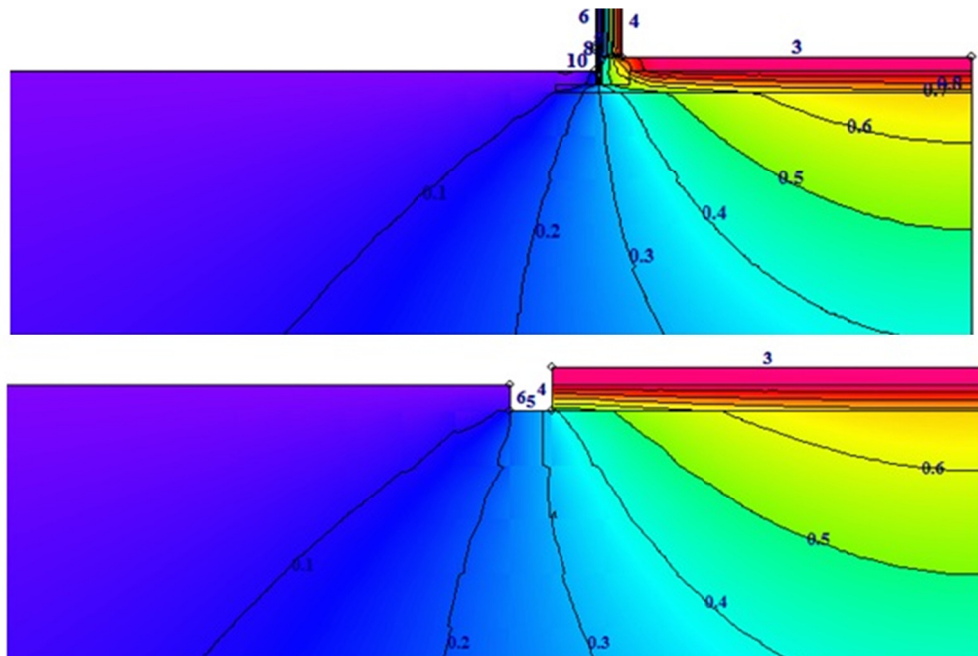
Flöde genom väggkant	q [W/(m ² ·K)]	Övrigt
Vägg, ber, HEAT2	0,1140	Mesh 50
Vägg, ber, HEAT3	0,1148	Mesh 20
Kant, ber, HEAT2	0,1724	Mesh 100
Kant, ber, HEAT3	0,1725	Mesh 100

En luftfylld stålpelare, VKR120, placeras i mellersta isoleringsskiktet längst kanten. λ för luft sätts till 0,025 W/(m·K). Den invändiga längden för varje vägg i beräkningen är 0,633 mm.

Tabell 12.5 – Invändig kant värmefflödeskontroll.

Invändig kant, putsad vägg	U-värde [W/(m ² ·K)]	Övrigt
Vägg, 1 m ²	0,0918	En meter vägg jämförs med ett invändigt hörn med fyra meter utvändigt väggyta. Det invändiga hörnet bidrar till en ökad isolering och är inte att betrakta som köldbrygga.
Invändig väggkant, 4 m ² utvändig area	0,3944	

Kantbalk



Figur 12.1 – Beräkningsmodell och referensfall för beräkning av kantbalk.

Tabell 12.6 – Köldbrygga i kantbalk vid olika marktyper.

Kantbalk - marktyper	λ_{mark} [W/(m·K)]	q_{ber} [W/(m ² ·K)]	q_{ref} [W/(m ² ·K)]	Ψ [W/(m·K)]	Övrigt
Silt	0,43	0,753	0,4109	0,3421	Beckomberga, typritning
Sand	1,5	0,9481	0,5575	0,3906	
Morän	2,3	1,001	0,5966	0,4044	

Bjälklagskant

Tabell 12.7 – Bjälklag, Typritning/Beckomberga.

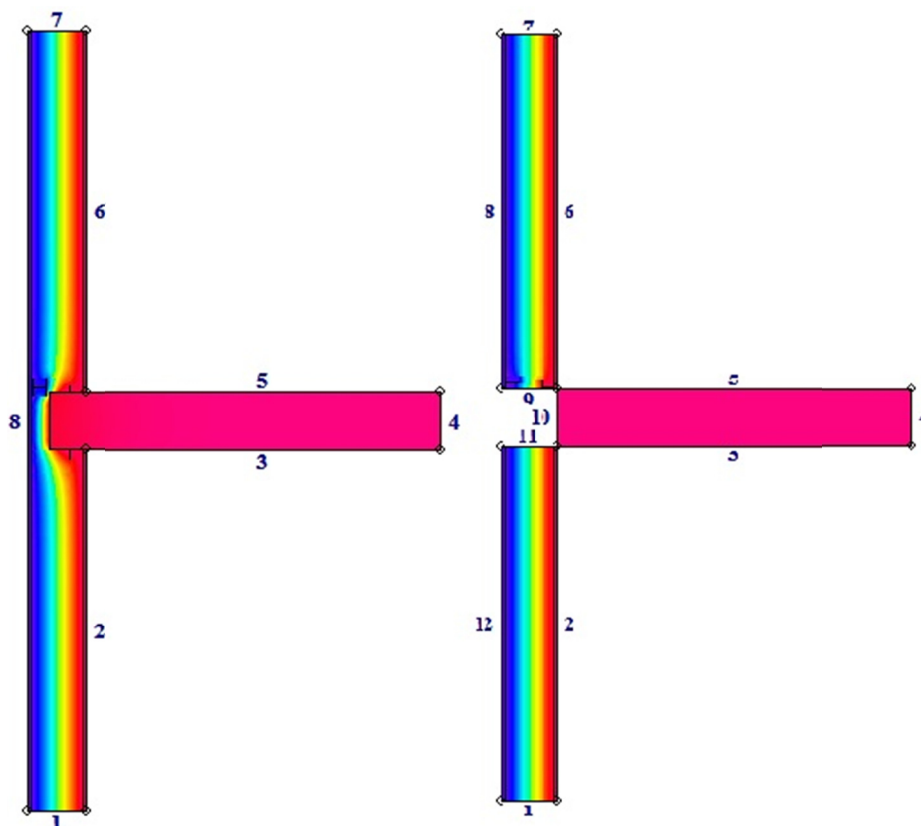
Beräknat värmeflöde genom del	q [W/(m ² ·K)]	Tjocklek [mm]
4000 vägghöjd, 2000 bjälklag		
HEAT2	0,5078	120 bjlk, xx120
HEAT2	0,5099	180 bjlk, xx120
HEAT2	0,5136	240 bjlk, xx120
HEAT2	0,5309	300 bjlk, xx120
HEAT2	0,5046	300 bjlk, xx145
HEAT2	0,4578	300 bjlk, xx195
1000 vägghöjd, 1000 bjlk		
HEAT2	0,1966	300 bjlk, xx120
HEAT2	0,1930	300 bjlk, xx145
HEAT2	0,1873	300 bjlk, xx195

Tabell 12.8 – Bjälklag Typritning Skalmur.

Beräknat värmeflöde genom del	q [W/(m ² ·K)]	Tjocklek [mm]
4000 vägghöjd, 2000 bjlk		
HEAT2	0,6530	300 bjlk, xx120
HEAT2	0,6165	300 bjlk, xx145
HEAT2	0,5514	300 bjlk, xx195

$$\Psi_{bjalk300} = q_{bjalk} - q_{vägg}$$

$$\Psi_{bjalk300} = 0,1966 - (1 - 0,3) \cdot 0,1134 = 0,1172 \text{ W/(m·K)}$$



Figur 12.2 – Bjälklagskant, typritning xx120, bjälklag 300 mm.

Fönster

Beräkning av köldbryggor i fönsteranslutning:

Tabell 12.9– Indata till och sammanställning av fönsterberäkningar.

Projekt	Beckomberga	Björka	Portvaken
Dimension [mm ²]	1640x890	1385x1385	988x1288
$A_{\text{fönster}}$ [m ²]	1,460	1,918	1,270
A_{karm} [m ²]	0,466	0,514	0,415
A_{glas} [m ²]	0,994	1,404	0,857
$U_{\text{fönster}}$ [W/(m ² ·K)]	0,9	0,9	1,0
U_{glas} [W/(m ² ·K)]	0,6	0,6	0,7
U_{karm} [W/(m ² ·K)]	1,54	1,72	1,61
λ_{glas} [W/(m·K)]	0,0668	0,0668	0,0795
λ_{karm} [W/(m·K)]	0,2087	0,2430	0,2224
q_{ber} [W/K]	0,9914	5,8840	0,8936
q_{ref} [W/K]	0,9371	5,7750	0,8424
Ψ [W/(m·K)]	0,0429	0,0789	0,0450

Björka, 1384x1384, drev 8mm. Övriga 10 mm drev.

Variation av area

130mesh, HEAT3. Fast U-värde på fönster om 0,9 och glas 0,6. Lambda glas är 0,0668.

Tabell 12.10 – Sammanställning av hur köldbryggan varierar med fönsterarea.

Dimension [mm ²]	800x800	1000x800	1000x1000	1640x890	1400x1200
Omsl. längd [m]	3,20	3,60	4,00	5,06	5,20
A _{fönster} [m ²]	0,64	0,8	1,0	1,460	1,68
A _{karm} [m ²]	0,28	0,32	0,36	0,466	0,48
A _{glas} [m ²]	0,3	0,48	0,64	0,994	1,2
U _{karm} [W/(m ² ·K)]	1,29	1,35	1,43	1,54	1,65
λ _{karm} [W/(m·K)]	0,1645	0,1752	0,1895	0,2087	0,2293
q _{ber} [W/K]	0,7001	0,7591	0,8195	0,9914	1,0490
q _{ref} [W/K]	0,6620	0,7170	0,7800	0,9370	0,9890
Ψ [W/(m·K)]	0,0436	0,0434	0,0433	0,0429	0,0429

Variation av U-värde

Fast area på fönster, glas och karm. Beckombergas fönster.

Tabell 12.11 – Fönster sammanställning varierande U-värde.

U _{fönster} [W/(m ² ·K)]	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
U _{glas} [W/(m ² ·K)]	0,533	0,6	0,67	0,73	0,8
U _{karm} [W/(m ² ·K)]	1,37	1,54	1,7	1,89	2,05
λ _{glas} [W/(m·K)]	0,0586	0,0668	0,0756	0,0833	0,0926
λ _{karm} [W/(m·K)]	0,1785	0,2087	0,2399	0,2783	0,3154
q _{ber} [W/K]	0,9547	0,9914	1,0281	1,0649	1,1020
q _{ref} [W/K]	0,9006	0,9371	0,9736	1,0101	1,0466
Ψ [W/(m·K)]	0,0428	0,0429	0,0431	0,0433	0,0438

Jämförelse mellan helt & kvarts fönster

Tabell 12.12 - Jämförelse av fönster.

Fönster	q [W/(m ² ·K)]	Övrigt
Beckomberga, Hel	4,0195 W/(m ² ·K) Köldbrygga, beräknad per meter: 0,0608 W/(m·K)	2 meter vägg från karmkant, 890x1640 mm ² , 10 mm drevning, 40 mm karm, mesh=130.
Beckomberga, Kvarts	1,0098 W/(m ² ·K) Köldbrygga, beräknad per meter: 0,0606 W/(m·K)	2 meter vägg från karmkant, 890x1640 mm ² , 10 mm drevning, 40 mm karm, mesh=130.

Hörn och punktköldbryggor

Hörn beräknas enskilt för att jämföra 2D med 3D. För övriga beräknas dessa för referensobjekten och redovisas i respektive referensobjekts tabell.

Tabell 12.13 – Jämförelse av hörn i 2D och 3D.

Kant	q [W/(m ² ·K)]	Längd/Yta [mm]
Mesh 100, HEAT2	0,2981	1x1 meter, vägg tjocklek 200 mm
Mesh 20, HEAT2	0,2968	1x1 meter, vägg tjocklek 200 mm
Mesh 100, Väg	0,1747	1 meter, tjocklek 200 mm.
Mesh 20, Väg	0,1747	1 meter, tjocklek 200 mm.
Mesh 100, Väg kapad	0,1397	0,8vägg, tjocklek 200 mm
Väg reducerad 0,8x0,8	0,1118 (0,8x0,1397)	0,8x0,8 m ² vägg
Hörn		
Mesh 100, HEAT3	0,3807	1x1x1 meter, vägg tjocklek 200 mm.
Mesh 20, HEAT3	0,3773	1x1x1 meter, vägg tjocklek 200 mm.
Mesh 100, HEAT3		

$$q_{HEAT2} = 0,2981 - 2 \cdot 0,1397 = \mathbf{0,0187 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}$$

$$q_{HEAT3} = 0,3807 - 3 \cdot 0,1397 \cdot 0,8 = \mathbf{0,0453 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}$$

$$q_{hörn} = 0,0453 - 3 \cdot 0,0187 = \mathbf{-0,0108 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}}$$

Reglar

Regel 45x70mm. Stål med $\lambda = 50$ och 5. Wood 0,13. Stål 1 mm tjocklek. 200 mesh. Typiska plåtreklar har en tjocklek mellan 0,7 och 1,5 mm (Gyproc).

Tabell 12.14 - Test av regelutförande.

	$\lambda_{trä}=0,13$	$\lambda_{stål}=5$	$\lambda_{stål}=50$
Regel [W/(m·K)]	0,0618	0,0615	0,1782

Beräkningar referensobjekt

En sammanställning av referensobjektens ingående data i form av dimensioner, materialegenskaper och detaljer görs i nedanstående tabeller. Värden för beräkningsmodeller och referensfall från HEAT presenteras och den beräknade köldbryggan för respektive detalj redovisas för varje referensobjekt. Principiellt gäller $\Psi_i = q_{\text{beräkningsmodell } i} - q_{\text{referensfall } i}$ men för exempelvis fönster hämtas värden från fönsterberäkningar. Mått hämtas från kapitel 5: Referensobjekt.

Beckomberga

Tabell 12.15 – Beckomberga.

Flöden genom del	enl. HEAT [W/(m ² ·K)]	Kommentar
Vägg, typ1	0,0918	Typritning med xx=145
Kantbalk ber.	1,0258	5 meter platta, mark underkant betong
Kantbalk ref.	0,6312	
Bjälklag ber.	0,2554	
Takkant ber.	0,3540	
Takkant ref.	0,2630	
Väggkant ber.	0,3922	4 m inv. area
Takhörn ber.	1,1429	400 mm isolering (genomsnitt)
Takhörn ref.	1,0965	400 mm isolering (genomsnitt)
Golvhörn ber.	2,8926	Mark 15x15, morän 2,3
Golvhörn ref.	2,7759	Mark 15x15, morän 2,3
Bjälklagshörn ber.	1,1580	Solid stålpelare 50x50mm
Bjälklagshörn ref.	1,1515	Solid stålpelare 50x50mm

Linjeköldbryggor (ψ)	ψ [W/(m·K)]	Kommentar	Längder [m]	Köldbrygga [W/K]
Fönster & dörr	0,0429	från fönsterberäkningar	600,0	25,7
Bjälklag	0,0718		295,4	21,2
Kantbalk	0,3946		73,9	29,2
Takkant	0,0910		73,9	6,7
Väggkant	0,0250		80,0	2,0
Balkonginfästning	0,2000	Halfen element	75,0	15,0
Punktköldbryggor (χ)	χ [W/K]		Antal	
Takhörn	0,0464		8	0,37
Kantbalkshörn	0,1167		8	0,93
Bjälklagshörn	0,0065		24	0,16
Summa				101,30

Björka, typhus A

Tabell 12.16 – Björka.

Flöden genom del	enl. HEAT [W/(m ² ·K)]	Kommentar
Vägg, homogen	0,1299	utan betongram, används för kant
Vägg, med pelare	0,1360	används för fönsterkonstruktion
Vägg, med ram	0,1465	beräknat värde enl. tillverkare 0,161
Tak	0,0655	U-värde för 550 mm mineralull=lösull
Platta	0,4590	heat utan vägg och kantbalk
Kantbalk med vägg	0,8910	2 meter vägg, 5 meter platta, 15x15 mark
Kantbalkvägg	0,2810	2 meter vägg
Bjälklag	0,7662	2 meter i varje riktning
Takkant Låg Långsida	0,4553	2 meter i varje riktning
Takkant Hög Långsida	0,4454	2 meter i varje riktning
Takkant Gavel	0,4504	2 meter i varje riktning
Väggkant	0,5689	2 meter i varje riktning
Lägenhetsskilj. vägg ber.	0,2862	
Lägenhetsskilj. vägg ref.	0,2595	
Takhörn ber.	1,7335	HEAT3
Takhörn ref.	1,7203	HEAT3
Golvhörn ber.	2,7145	HEAT3, 15x15, morän 2,3
Golvhörn ref.	2,6828	HEAT3, 15x15, morän 2,3
Bjälklagshörn ber.	3,7314	HEAT3
Bjälklagshörn ref.	3,7086	HEAT3

Linjeköldbryggor (ψ)	ψ [W/(m·K)]	Kommentar	Längder [m]	Köldbrygga [W/K]
Fönster & dörr	0,079	från fönsterberäkning	214,4	16,9
Bjälklag	0,107		54	5,8
Kantbalk	0,151		54	8,2
Takkant - Låg Långsida	0,024		0	0,0
Takkant - Hög Långsida	0,014		0	0,0
Takkant - Gavel	0,019	medelvärde	54	1,0
Väggkant	0,049		20	1,0
Lägenhetsskilj. vägg	0,027		7	0,2
Punktköldbryggor(χ)	χ [W/K]		Antal	
Takhörn	0,013		4	0,05
Kantbalkshörn	0,032		4	0,13
Bjälklagshörn	0,023		4	0,09
Summa				33,31

Portvakten

Tabell 12.17 – Portvakten.

Flöden genom del	enl. HEAT [W/(m ² ·K)]	Kommentar
Vägg, Vån. 1, homogen	0,1102	
Vägg	0,1813	
Vägg, Vån. 2-8	0,1717	Luftspalt simulerad med Rsi
Kantbalk med vägg	0,9302	1 m vägg, 5 m platta, 15x15 m ² mark
Kantbalk utan kb.	0,6242	2 meter vägg
Bjälklagskant Vån. 1 ber.	0,3091	
Bjälklagskant Vån. 2-8 ber.	0,3872	4,4m -0,51m
Takkant	0,3341	2 meter i varje riktning
Väggkant Vån. 1 ber.	0,4975	2 meter i varje riktning
Väggkant Vån. 1 ref.	0,4408	
Väggkant Vån. 2-8 ber.	0,3727	2 meter i varje riktning
Väggkant Vån. 2-8 ref.	0,3420	
Takhörn ber.	0,3340	HEAT3
Takhörn ref.	0,3046	HEAT3
Kantbalkshörn ber.	6,4320	HEAT3, 15x15, morän 2,3
Kantbalkshörn ref.	6,3037	HEAT3, 15x15, morän 2,3
Bjälklagshörn ber.	0,4199	HEAT3
Bjälklagshörn ref.	0,4195	HEAT3

Linjeköldbryggor (ψ)	ψ [W/(m·K)]	Kommentar	Längder [m]	Köldbrygga [W/K]
Fönster & dörr	0,0450	från examensarbete	958,5	43,133
Bjälklag Vån. 1	0,0272		72	1,958
Bjälklag Vån. 2-8	0,0346		432	14,935
Kantbalk	0,3060		72	22,032
Takkant	0,0328		72	2,362
Väggkant Vån. 1	0,0567		10	0,567
Väggkant Vån. 2-8	0,0307		70	2,149
Punktköldbryggor(χ)	χ [W/K]		Antal	
Takhörn	0,004		4	0,016
Kantbalkshörn	0,1283		4	0,513
Bjälklagshörn	0,0037		28	0,104
Summa				87,77

Vallda Heberg, kantbalk

Kantbalken från referensobjektet Vallda Heberg beräknas enligt nedan. Marktypen är morän med $\lambda=2,3$ W/(m·K).

$$\Psi_{kant,Vallda} = q_{Grund} - q_{Platta+vagg}$$

$$\Psi_{kant,Vallda} = 0,6269 - 0,5515 = \mathbf{0,0754 \text{ W/(m·K)}}$$