



CHALMERS



Köldbryggors påverkan på flerbostadshus från sent 60-tal

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggingenjör

ALVA ENGSTRÖM
JOHANNA KARLSSON

EXAMENSARBETE BOMX03-16-25

Köldbryggors påverkan på flerbostadshus från sent 60-tal

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ALVA ENGSTRÖM

JOHANNA KARLSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2016

Köldbryggors påverkan på flerbostadshus från sent 60-tal
Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

ALVA ENGSTRÖM

JOHANNA KARLSSON

© ALVA ENGSTRÖM, JOHANNA KARLSSON, 2016

Examensarbete 2016:25 / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2016

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

Omslag:
Bällstavägen 224, Bromma, referensobjekt i arbetet (Författarnas egen bild).

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2016

Köldbryggors påverkan på flerbostadshus från sent 60-tal

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ALVA ENGSTRÖM

JOHANNA KARLSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Byggnadsfysik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

För att möta framtidens energikrav behöver en stor del av Sveriges bostadsbestånd upprustas och med det energieffektiviseras. Inför en energieffektivisering utreds byggnadens specifika energianvändning och det är relevant att lokalisera klimatskalets svagheter. Att väggars U-värde påverkar värmeförlusterna är vedertaget, däremot är köldbryggors påverkan inte lika känd. Köldbryggor uppstår bland annat när två konstruktionsdelar möts och till följd av detta sker en ökad värmeförlust. För att uppskatta köldbryggors påverkan läggs ofta ett schablonpåslag till klimatskalets värmeförluster. Denna metod har visat sig vara osäker. Det beror främst på att köldbryggors påverkan skiljer sig mycket åt mellan konstruktionslösningar och inte nödvändigtvis relaterar till klimatskalets övriga värmeförluster, som metoden med schablonpåslag antyder.

Den idag mest noggranna beräkningsmetoden är att beräkna varje köldbryggas värmeförlust, Ψ [W/mK]. I denna rapport beräknas Ψ -värden för åtta vanliga köldbryggor i en fallstudie på ett tidstypiskt flerbostadshus byggt på slutet av 60-talet. Detta görs med simulering i datorprogrammet COMSOL Multiphysics. Syftet är att beräkna hur stor påverkan köldbryggor egentligen har på värmeförlusterna på den specifika byggnaden och jämföra resultatet med schablonpåslag.

Resultaten visar på högre Ψ -värden jämfört med nyare konstruktionslösningar. Däremot är köldbryggornas påverkan jämfört med klimatskalets värmeförluster mindre än vanligt förekommande schablonvärden. Detta misstänks bero på att klimatskalets värmeförluster generellt är höga. Metoden med schablonpåslag bör därför användas med försiktighet. Förhoppningen är att de Ψ -värden som beräknats kan användas på andra, liknande byggnader. Förutsättningen är att konstruktionen ser i princip likadan ut.

Nyckelord: Byggteknik, byggnadsfysik, köldbryggor, Ψ -värden, psi-värden, schablonvärde, energieffektivisering, värmeförlust, COMSOL Multiphysics, 60-tal.

Impact from Thermal Bridges on Apartment Buildings from late 60's

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

ALVA ENGSTRÖM

JOHANNA KARLSSON

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Building Technology

Building physics

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

In order to meet future energy demands, a large part of Sweden's housing require renovation and energy efficiency. Ahead of energy efficiency, the specific energy usage of the building is investigated and it becomes relevant to locate the weaknesses of the building envelope. The impact from U-values on the building envelope is well known, although the impact from thermal bridges is not as recognized. Thermal bridges occur for instance in junctions between two building elements and as a result, heat loss increases. To estimate the effect of the thermal bridges, a standard increment to the heat losses of the building envelope is frequently used. However, this method has turned out to be unreliable. This is mainly because the impact of thermal bridges diverse between different design solutions. It is not necessarily related to the other heat losses of the building, which is indicated by the method of standard increment.

The currently most accurate method is to calculate the heat loss of each thermal bridge, Ψ [W/mK]. In this thesis, Ψ -values for eight common thermal bridges from a typical apartment building from the late 60's, are calculated in a case study. This is made by using computer simulations in COMSOL Multiphysics. The purpose is to quantify the impact of thermal bridges compared to the heat losses of the specific building and compare the results with standard increments.

The results demonstrate that the Ψ -values are higher, compared to more recent design solutions. However, compared to the heat losses of the climate envelope, the effect of the thermal bridges are less than commonly used standard increment. This is suspected to be due to the generally high heat losses of the climate envelope. Therefore, the method with standard increment should be used with caution. The expectation is that the Ψ -values calculated can be used on other similar apartment buildings, presuming that the design solution are equivalent.

Key words: Building technology, building physics, thermal bridges, Ψ -values, Psi-values, standard increment, energy efficiency, heat loss, COMSOL Multiphysics, 60's.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
ORDLISTA	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Metod	2
2 TEORI	3
2.1 Energianvändning i byggnader	3
2.1.1 Krav från Boverket	3
2.1.2 U-värde	3
2.1.3 En byggnads specifika energianvändning	4
2.2 Köldbryggor	4
2.2.1 Definition av en köldbrygga	4
2.2.2 Olika typer av köldbryggor	6
2.2.3 Beräkningsmetoder för köldbryggor	6
2.3 Användning av schablonvärden	7
3 STUDERAD BYGGNAD	9
3.1 60-talets byggteknik	9
3.2 Referensobjekt Beckomberga	10
3.2.1 Geografiskt läge	10
3.2.2 Konstruktion	11
3.2.3 Granskning av bygghandlingar	12
3.2.4 Urval av köldbryggor	13
4 BERÄKNINGAR	15
4.1 COMSOL Multiphysics	15
4.2 Beräkning av Ψ -värden	15
4.2.1 Geometri	15
4.2.2 Material	17
4.2.3 Randvillkor	19
4.2.4 Uträkning	20

4.3	Studerade detaljer	22
4.4	Beräkning av U-värden	25
4.5	Beräkning av andel köldbryggor	26
5	RESULTAT	27
5.1	Resultat av Ψ -värden	27
5.2	Transmissionsförluster	28
5.3	Resultat av U_m -beräkningar	29
5.4	Resultat av andel köldbryggor	29
6	DISKUSSION	31
6.1	Tolkning av Ψ -värden	31
6.2	Tolkning av andelen köldbryggor	31
6.3	Metodens lämplighet	33
6.4	Felkällor	33
7	SLUTSATS	34
7.1	Förslag till framtida studier	34
8	REFERENSER	35
	BILAGA 1: STUDERADE DETALJER	38
	BILAGA 2: BERÄKNING AV U-VÄRDEN OCH AREOR	50
	BILAGA 3: ORIGINALRITNINGAR	57

Förord

Examensarbetet, som omfattar 15 högskolepoäng, är en del av byggingenjörsutbildningen på 180 högskolepoäng på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Arbetet har genomförts på institutionen för Bygg och miljöteknik, avdelningen Byggnadsteknologi, i samarbete med konstruktionskonsultföretaget Kåver och Mellin AB och Stockholmshem AB.

Inledningsvis vill rikta ett stort tack till våra handledare för oförtruten entusiasm från första början. Vår handledare och examinerator på Chalmers, biträdande professor Angela Sasic Kalagasidis, vill vi tacka för handledning och stöttning under arbetet och många goda idéer. Tom Noremo på Kåver och Mellin AB tackar vi för handledning på distans och besök på Kåver och Mellins kontor i Stockholm, hjälp med granskning av ritningar, anordning av studiebesök och kontakt med Stockholmshem AB. Sist med inte minst riktas ett tack till doktorand Tommie Månsson som hjälpt oss att komma igång med arbetet i datorprogrammet COMSOL Multiphysics och därefter varit tillgänglig och behjälplig vid frågor som dykt upp.

Med examensarbetet har vi fördjupat våra kunskaper inom byggt teknik, byggnadsmaterial och även mer specifikt kring köldbryggor. Vi har också haft möjlighet att lära oss COMSOL Multiphysics, vilket vi ser som användbart även i framtiden.

Göteborg, juni 2016

Alva Engström & Johanna Karlsson

KÅVER & MELLIN AB
KONSULTERANDE INGENJÖRER

Stockholmshem

Beteckningar

λ	Värmeledningsförmåga (Värmekonduktivitet) [W/mK]
Ψ	Värmegenomgångskoefficient för linjära köldbryggor [W/mK]
χ	Värmegenomgångskoefficient för punktformiga köldbryggor [W/K]
A_{om}	Omslutande area mot uppvärmd inneluft hos en byggnad [m^2]
q	Värmeflöde genom köldbrygga [W/mK]
Q	Värmeflöde [W]
U_m	En byggnads genomsnittliga värmegenomgångskoefficient [W/ m^2 K]
ΣUA	Total transmissionsförlust genom klimatskalet [W/K]
$\Sigma \Psi l$	Total transmissionsförlust genom köldbryggor [W/K]
R_{si}	Inre värmeövergångsmotstånd [m^2K/W]
R_{se}	Yttre värmeövergångsmotstånd [m^2K/W]

Ordlista

Klimatskal	Byggnadens yttre hölje mot uppvärmd yta. Består dels av tak, väggar, golv men även fönster och dörrar.
Ramstycke	Beskriver ett hammarband i en takkonstruktion. Fungerar som upplag för takstolarna och håller ihop takkonstruktionen.
Schablonvärde	Procentpåslag på en byggnads transmissionsförluster för att beakta köldbryggor.
Transmissionsförlust	Här värmeläckage på grund av energiöverföring genom klimatskalet, UA.
Värmeflöde	Eller värmeöverföring. Transport av värmeenergi på grund av temperaturskillnad mellan två medier.
Värmeledningsförmåga	Materialegenskap som anger hur väl ett material leder värme.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Idag är intresset för energieffektivisering stort inom byggbranschen. I både nya och gamla byggnader behöver energibehovet minimeras och möta framtidens krav. Liksom utomhusklimat, val av uppvärmningssystem samt tjocklek och typ av isolermaterial, påverkar även köldbryggor en byggnads totala energibehov.

Stora köldbryggor gör att en byggnads energibehov ökar. Det är däremot inte alltid självklart hur stor påverkan köldbryggor egentligen har på energibehovet. För att beräkna en byggnads energibehov behöver köldbryggorna inkluderas och då används ofta schablonvärden. Schablonvärden används på grund av att det är tids- och kostnadskrävande att beräkna varje köldbrygga exakt. Problemen med schablonvärdena är att det ofta är svårt att avgöra vilket påslag som bör väljas till den specifika byggnaden.

Stockholmskem AB äger en stor del allmännyttiga hyresrätter i Stockholm (Stockholmskem, 2016). I samarbete med konstruktionskonsultföretaget Kåver och Mellin AB utför Stockholmskem AB ett projekt kallat energi- och underhållsåtgärder. I projektet inventeras bostadsbeståndets skick, bland annat med hänsyn till energiförbrukningen. Efter att energibalansberäkningar utförts på vissa byggnader har det upptäckts att den beräknade energiförbrukningen inte alltid överensstämmer med samma byggnads uppmätta energiförbrukning. Det kan bero på fel i indata, vilket leder till felaktiga resultat. Köldbryggornas schablonvärden är viktig indata och kan vara en faktor till eventuella felaktigheter. Som nämnts är de svåra att verifiera för specifika byggnader med olika konstruktioner.

Kåver och Mellin AB efterfrågar med bakgrund av detta en sammanställning av verklighetstroga och väl uträknade köldbryggor för tidstypiska flerbostadshus, med tydliga förklaringar och information om byggnaden de räknats på.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att beräkna hur stor påverkan på transmissionsförlusterna köldbryggor har i ett utvalt tidstypiskt flerbostadshus. Resultaten kan förhoppningsvis användas på liknande byggnader. Framtida energibalansberäkningar kommer således bli mer tillförlitliga och verklighetstroga.

1.3 Avgränsningar

- Arbetet avgränsas till beräkningar på ett flerbostadshus.
- Endast långsgående köldbryggor beaktas, ej punktförmiga köldbryggor.
- Köldbryggor från fönster och dörrar har inte beräknats, vilket huvudsakligen beror på att ritningsunderlag och information om deras utformning saknats. U-värden för fönster har antagits för att beakta deras påverkan.
- Det förutsätts i beräkningsskedet att byggnaden inte genomgått några större förändringar eller renoveringar.
- För beräkningar används programmet COMSOL Multiphysics 5.1, där stationära förhållanden har förutsatts.

1.4 Metod

Metodkapitlet beskriver det arbetssätt som används i projektet. De innefattande delarna beskrivs kronologiskt, men processen är iterativ.

Genom arbetets gång har teoretisk kunskap inom ämnesområdet inhämtats genom litteraturstudier som innefattat vetenskapliga publikationer, läroböcker och tidigare examensarbeten. En del relevanta ingångsvärden har även hämtats från värmetekniska tabeller.

Som fallstudie har ett tidstypiskt flerbostadshus beläget i Stockholm valts i samråd med Kåver och Mellin AB och Stockholmshem AB. Den valda byggnaden aktualiseras i projektet energi- och underhållsåtgärder inom en snar framtid.

Handlingar tillhörande den valda byggnaden har hämtats från Stockholms Stads hemsida. Förfarandet och de antaganden som gjorts kring handlingarna beskrivs under Kapitel 3.2.3. Åtta detaljer, som ger upphov till köldbryggor, valdes ut i samråd med Tom Noremo på Kåver och Mellin AB. De valda detaljerna ritades upp i datorprogrammet AutoCAD för att förenkla, dels för författarna, men även för läsaren. Det sistnämnda beräknades vara tidskrävande och beslutades tidigt göras i mån av tid.

Till Kåver och Mellin AB i Stockholm har gjorts två dagsbesök för handledning. I huvudsak ägnades första tillfället åt att granska ritningsunderlaget och välja ut köldbryggor. Under det andra besöket gjordes platsbesök till flerbostadshuset. Via Stockholmshem AB kunde två lägenheter besökas och här kontrollerades huruvida förutsättningarna och ritningarna stämde med verkligheten.

Beräkningar av värmefflöde har gjorts i COMSOL Multiphysics 5.1. Programmet rekommenderades av handledarna och det fanns tillgängligt på Chalmers. Inledningsvis var doktorand Tommie Månsson behjälplig med en introduktion till programmet. Efter handpåläggning i Microsoft Excel beräknades värmegenomgångskoefficienter (Ψ) för de utvalda linjära köldbryggorna.

Slutligen har handberäkningar och Excel används för att beräkna U-värden och areor för byggnadens klimatskal, samt andel köldbryggor, för att sedan kunna beräkna byggnadens genomsnittliga värmegenomgångskoefficient, U_m .

2 Teori

I detta kapitel ges teori kring energianvändning i byggnader, köldbryggor och beräkningsmetoder för köldbryggor.

2.1 Energianvändning i byggnader

Bostads- och servicesektorn stod år 2014 för 25 % av Sveriges totala energiförbrukning. Byggsektorn har minskat sin energianvändning med 15 % sedan 1970, men det är fortfarande långt kvar och mycket kan göras för att ytterligare minska energianvändningen (Ekonomifakta, 2016). 50 % av klimatbelastningen utgår från drift- och underhållsskedet, räknat på ett flerbostadshus i betong (IVA, Sveriges Byggindustrier, 2014, s.21). Det är väsentligt med åtgärder för en fortsatt minskad energianvändning vid just drift- och underhållsskedet.

En viktig åtgärd för att åstadkomma energibesparingar är att minimera värmebehovet. För detta behöver klimatskalet vara tätt och byggnadens värmeförluster behöver reduceras. Dagens schablonvärden antyder att en stor del, 20-30 %, av det totala värmeläckaget sker genom köldbryggor (Isover 2007, s.13). Det gör att en minimering av köldbryggorna är en central åtgärd för att minska energianvändningen.

2.1.1 Krav från Boverket

I BBR (Boverkets Byggregler) anges krav på energianvändning och U_m -värde (genomsnittlig värmegenomgångskoefficient) i både nybyggda och ombyggda hus. Beroende på geografiskt läge skiljer sig dessa åt och Sverige är därför indelat i tre klimatzoner. Byggnadens uppvärmningskälla ger likaså olika krav. Tabell 1 redovisar krav för flerbostadshus i klimatzon 3, vilken innefattar Stockholm där arbetets referensobjekt är beläget.

Tabell 1. BBR:s krav på energianvändning, klimatzon 3. (BFS 2011:6, s.161).

	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient (U_m) [W/m ² K]	Byggnadens specifika energianvändning [KWh/m ²]
Elvärme	0,40	50
Annat uppvärmningssystem	0,40	80

2.1.2 U-värde

U-värdet, eller värmegenomgångskoefficienten, beskriver en byggnadsdels isoleringsförmåga och transmissionsförlust. U-värde anges i [W/m²K]. Byggnadsdelars U-värde varierar beroende på dess tjocklek och material. Ett U-värde för en byggnadsdel med olika materialskikt, till exempel en vägg med fasadskiva, mineralull och betong, är en viktning mellan skiktens tjocklekar och värmeledningsförmåga. U-värden beräknas med U-värdesmetoden och λ -värdesmetoden i Bilaga 2.

För att få ett representativt U-värde på en byggnad brukar ett genomsnittligt U-värde räknas ut, U_m . Respektive byggnadsdels U-värde och area summeras då med köldbryggorna (Petersson, 2009, s.264). Summan divideras därefter med klimatskalets omslutande area. Ekvation för detta finns i avsnitt 5.4.

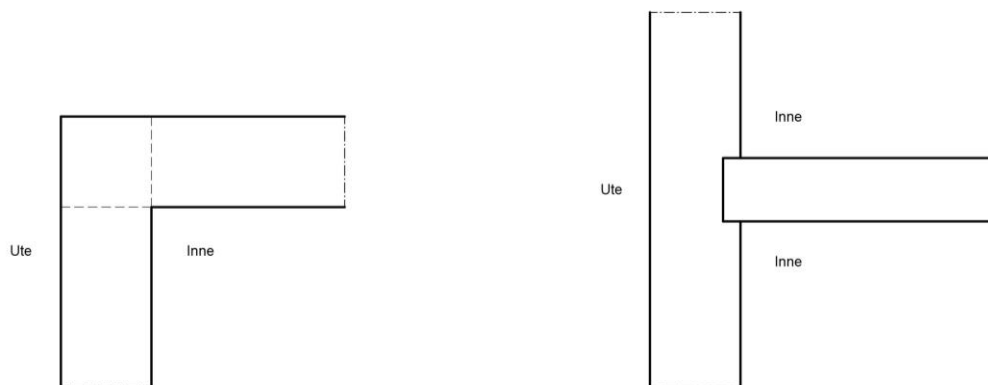
2.1.3 En byggnads specifika energianvändning

Med hjälp av en byggnads U_m -värde kan dess energianvändning i [KWh/m²] beräknas. Energinvändningen anges per uppvärmd yta, A_{temp} [m²] och år. Beräkningen kan göras med handberäkningar eller med datorprogram som IDA (Indoor Climate and Energy) eller VIP-energy. Oavsett beräkningsmetod krävs data som ventilationssystem, uppvärmningssystem och klimatdata. Inga beräkningar kring energianvändning görs i denna rapport.

2.2 Köldbryggor

2.2.1 Definition av en köldbrygga

Köldbryggor i byggnadskonstruktioner beskrivs enligt standarden SS-EN ISO 10211:2007. Köldbryggor är delar i byggnadens klimatskal där en ändring av klimatskärmens i övrigt homogena värmemotstånd sker. De uppstår då klimatskalet bryts av ett material med annan värmeledningsförmåga, vid en geometrisk ändring i konstruktionen eller där invändiga och utvändiga areor skiljer sig åt, vid till exempel hörn, se Figur 1.

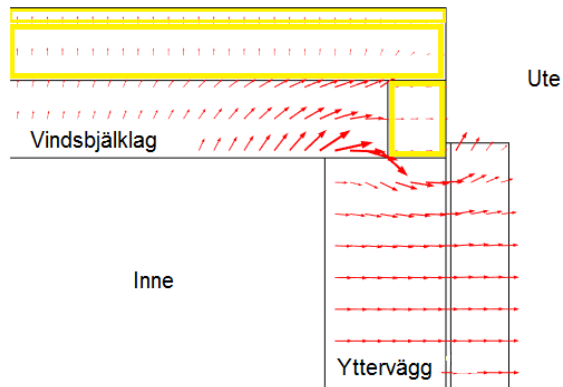


Figur 1. Geometrisk förklaring av köldbryggor.

Köldbryggor uppträder således generellt i alla möten mellan konstruktionsdelar eller där en ändring i geometrin uppstår. Jämfört med de delar där inga köldbryggor finns, ger köldbryggorna följande konsekvenser:

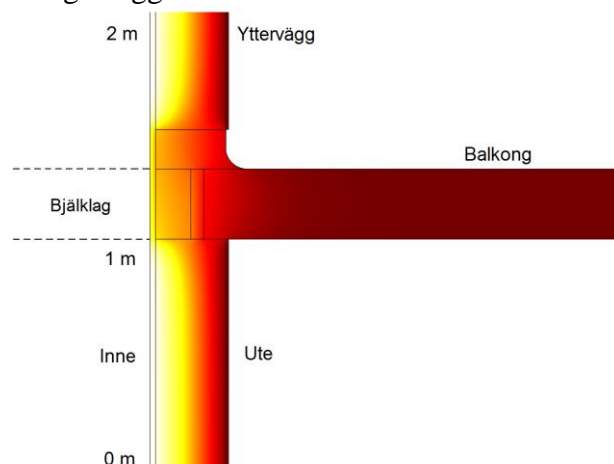
- En ändring i värmeledningsförmåga, se Figur 2 och 3.
- En ändring av den invändiga yttemperaturen och temperaturfördelningen i väggen, vilket kan ge konsekvenser som fuktproblem, se Figur 4.

I Figur 2 visas värmeflödets riktning med pilar. Bilden visar en takfot, med isoleringen markerad i gult. Värmeflödet tar en tydlig omväg runt isoleringen, som har en lägre värmeledningsförmåga än lättbetongen och teglet i ytterväggen.



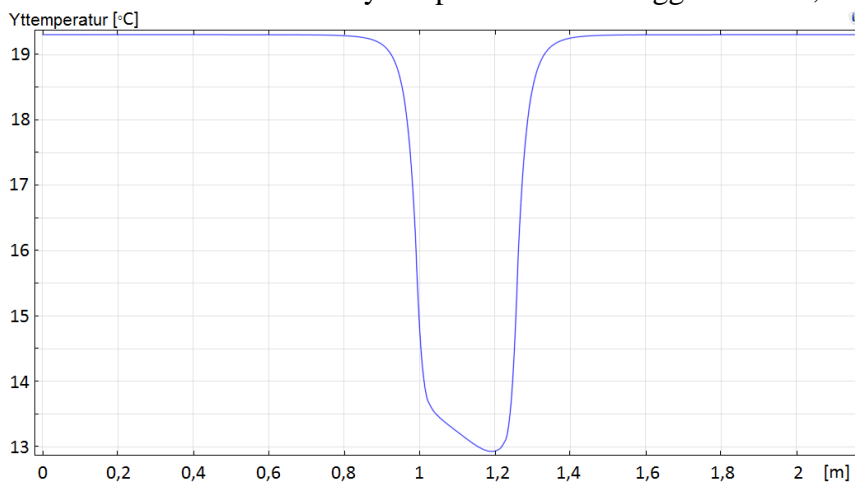
Figur 2. COMSOL-illustration av värmeflöde vid takfot.

Figur 3 visar värmefördelningen inne i konstruktionen vid en balkonginfästning. Rött motsvarar utetemperatur och vitt är innetemperatur. Det syns tydligt att temperaturfördelningen i väggen förändras vid balkonginfästningen, vilket påvisar köldbryggan som här beror på att mindre isolering finns vid infästningen jämfört med övriga väggen.



Figur 3. Värmeledning vid balkonginfästning.

Konsekvensen blir minskad ytttemperatur utmed väggens insida, se Figur 4.



Figur 4. Graf som visar ytttemperatur på innerväggen vid balkonginfästningen i figur 3. Ytttemperaturen minskar märkbart från ca 20°C till 13°C.

2.2.2 Olika typer av köldbryggor

Köldbryggor delas in i två typer, långsgående och punktformiga. Båda bidrar till ökad värmeförlust genom ökat värmeflöde.

- **Långsgående köldbryggor**

Till exempel väggarnas anslutningar till taket, till bottenplattan, till bjälklaget samt där fönster och dörrar ansluter bidrar samtliga till en ökad värmeförlust. (Petersson, s. 279-280). De långsgående köldbryggorna beskrivs med värmegenomgångskoefficienten ψ , Ψ [W/mK]. Ψ -värdet anger värmeflödet [W] som avgår genom den långsgående köldbryggan per meter köldbrygga och per Kelvin. Ett lägre Ψ -värde innebär mindre värmetransport via köldbryggan. Vid beräkning multipliceras Ψ -värdet med köldbryggans längd mot uppvärmd inneluft för att fås i [W/K]. För till exempel ytterväggshörn är längden rumshöjden.

- **Punktformiga köldbryggor**

I regel uppstår punktformiga köldbryggor vid genomföringar, till exempel spik.

Värmegenomgångskoefficienten för en punktformig köldbrygga kallas χ och har enheten [W/K] då köldbryggan är punktformig.

I detta projekt beräknas endast långsgående köldbryggor.

2.2.3 Beräkningsmetoder för köldbryggor

Huvudsakligen finns två sätt att beräkna exakta Ψ -värden på köldbryggor, genom handberäkningar eller datorstödda beräkningar. Oavsett metod jämförs en verklig detalj med hur detaljen skulle sett ut utan köldbrygga. Ψ -värdet är då skillnaden mellan deras värmeflöden.

I examensarbetet ”Metoder för köldbryggeberäkningar i designprocessen” jämförs olika metoder för beräkning av köldbryggor (Wingård, 2009). I arbetet jämförs så kallade förenklade metoder med datorstödda metoder. De förenklade metoderna är snabba att använda men datormetoder ger mer noggranna resultat. I diskussionen konstaterar även Wingård att trots att förenklade metoder är snabba kan de vara svåra att använda på grund av tolkningsfrågor och att de båda metoderna bör användas i kombination med varandra.

Ofta används standarder vid köldbryggeberäkningar, som kan användas som underlag för handberäkningar och datorberäkningar. Wingård sammanfattar dessa standarder överskådligt (Wingård, 2009, s.10). Standarder kan vara kostsamma att köpa in och det finns inga garantier att projektörer har tillgång till flera olika standarder. Den standard som varit tillgänglig i projektet är SS-EN ISO 10211:2007.

Datorstödda beräkningar med numeriska metoder utförs med olika programvaror, där HEAT 2 och HEAT 3 samt COMSOL Multiphysics är några exempel. HEAT används oftare inom branschen och är något enklare än COMSOL Multiphysics. Programmen baseras på olika metoder, FDM (Finita differensmetoden) respektive FEM (Finita elementmetoden), (Wingård, 2009, s.16). I HEAT 2 kan 2D-modelleringar göras och HEAT 3 används vid 3D modellering, men HEAT 2 är ofta fullt tillräckligt och modelleringen går fortare och är enklare (Danebjer, Ekström

2012). I detta arbete används COMSOL Multiphysics för beräkning av köldbryggor. Närmare om COMSOL och den beräkningsmetod som använts behandlas i Kapitel 4.1 och 4.2.

Rimliga Ψ -värden finns tabellerade för olika sorters köldbryggor. Sådana värden finns bland annat i ”Tillämpad byggnadsfysik” (Petersson, 2009, s.279) och redovisas i Tabell 2 nedan. I samma tabell jämförs dessa värden med uträknade Ψ -värden på specifika detaljer från två examensarbeten. Danebjer och Ekström har beräknat köldbryggor i tre lågenergihus. Noremo har påbörjat ett detaljbibliotek i syfte att skapa en metodik och förenkla beräkningar för byggnadskonstruktörer.

Tabell 2. Jämförelse av Ψ -värden.

	(Petersson, 2009, s.279)	(Danebjer och Ekström, 2012, s.61)	(Noremo, 2012)
Bjälklag		0,072	-
Kantbalk	0,00-0,10	0,395	0,1785 (s.33)
Balkonginfästning	0,04-0,40	0,2	-
Yttervägg (hörn)	0,03-0,06	0,025	-
Takfot	0,02-0,06	0,092	0,0364 (s.37)
Innervägg - yttervägg	0,01-0,04	0,027	-

På företag förekommer interna bibliotek med Ψ -värden för deras specifika konstruktionslösningar som genom att sättas direkt i ekvation 5 beräknar U_m .

2.3 Användning av schablonvärden

Ett alternativ till att beräkna köldbryggor exakt är att göra ett schablonpåslag till transmissionsförlusterna (Boverket, 2012). Ett schablonpåslag på cirka 20 % refereras ofta till, men författarna misstänker att det värdet varierar i hög grad och hoppas kunna bevisa det.

15-20 % har visat sig vara köldbryggors inverkan gällande småhus, men för flerbostadshus kan linjära köldbryggors påverkan vara större (Boverket, 2012, s.53). I Isoverboken (Isover, 2007, s.13), står att vanliga linjära köldbryggor ofta motsvarar 20-30 % av värmeförlusterna. Petersson (2009, s.279) menar att Ψ -värdet rimligen påverkar U_m -värdet ungefär 5 %, eventuellt något mer.

För att en byggnad ska klassas som miljöbyggnad måste olika bedömningskriterier uppnås för att nå nivåerna brons, silver och guld. Även här är 20 % det schablonvärde som används vid påslag på transmissionsförlusterna då nivå brons och silver eftersträvas. För att uppnå nivå guld krävs däremot att köldbryggorna räknas ut och redovisas (Sweden Green Building Council, 2014, s.11-12). Hur köldbryggorna är beräknade skall framgå av redovisningen och i det fall de förväntas utgöra mindre än 20 % av transmissionsförlusterna skall detta motiveras.

Metoden att använda ett schablonvärde är vansklig, då det varierar mycket mellan olika byggnader. Detta konstaterar Danebjer och Ekström (2012) i examensarbetet ”Köldbryggor i lågenergihus”. Gällande lågenergihus bör schablonen för de totala transmissionsförlusterna ligga på mellan 35-40 %, vilket i många fall skulle innebära en överskattning i de fall köldbryggor tagits i beaktande konstruktionsmässigt (Danebjer och Ekström, 2012, s.4). I samma rapport nämns att schablonpåslaget blir större på grund av att väggar, tak, golv och fönster har förbättrade U-värden men köldbryggor har inte förbättrats märkbart. De står således för en större del av transmissionsförlusterna. Danebjer och Ekström trycker därför på att det är viktigt att beräkna köldbryggor.

Berggren och Wall (2013) undersöker i en artikel kunskapsnivån för köldbryggor bland svenska ingenjörer och arkitekter för att se huruvida det finns risk för missförstånd och behov av tydligare riktlinjer. 100 arkitekter och ingenjörer tillfrågades i ett formulär rörande köldbryggor och energianalys, 73 svarade. För att räkna med köldbryggor var det vanligast att räkna mängden köldbryggor, varpå de multiplicerades med värden från litteratur eller energiberäkningsprogram (44 %). Därefter vanligast förekommande, (22 %), var att använda schablonvärden. De schablonvärden som användes varierade mellan 5 % och 20 % med medianen 15 %.

3 Studerad byggnad

En tidstypisk byggnad har valts som referensobjekt till en fallstudie. Kapitlet inleds med teori kring byggnader på 60-talet. Sedan introduceras referensobjektet, hur granskandet av handlingar gått till och hur köldbryggor valts ut.

3.1 60-talets byggteknik

Under 60-talet var bostadsbristen stor i Sverige. Det och en tid av stor ekonomisk tillväxt och framtidsoptimism bidrog till en expansiv byggbransch och föranledde miljonprogrammet, vilket gick ut på att bygga bort bostadsbristen. Typiskt för miljonprogrammet var produktion av storskaliga bostadsområden, ofta med industrialisering och standardlösningar. Trots att många förknippar miljonprogrammet med just storskalighet var de flesta hus som byggdes lamellhus i tre våningar (Boverket, 2014). Miljonprogrammet resulterade i över en miljon nya bostäder mellan åren 1965-1974. Detta inkluderar alla upplåtelseformer och typer av bostäder. Byggandet hade sin högsta nivå under åren 1967-1970 och i genomsnitt byggdes under dessa år 15 000 lägenheter årligen. Således var bostadsköerna borta redan år 1970 varefter byggandet avtog (Boverket, 2014). Samtidigt brukar 1961-1975 kallas rekordåren. Drygt 35 % av de flerbostadshus som byggdes då uppfördes i Stockholm, Göteborg och Malmö (Industrifakta AB, 2008).

Stockholms stadsmuseum beskriver fasadmateriell från 1960- och 70-talet. På 60-talet var tegelfasader vanligt. Bland de flerbostadshus som byggdes i Sverige mellan 1960-1975 hade nära en tredjedel tegelfasader. Tegelfasaderna från denna tid var sällan bärande element utan bakom fasaden fanns en konstruktion bestående av träreglar och lättbetong eller betongskivor (Stockholms stad, 2016). I examensarbetet "Köldbryggor i flerbostadshus byggda under 1950- och 1960-talen" skrivs även att förhärskande från 1950- och 60-talen var elementbyggd betongstomme eller murad stomme i lättbetong och tegel (Ström, 1988).

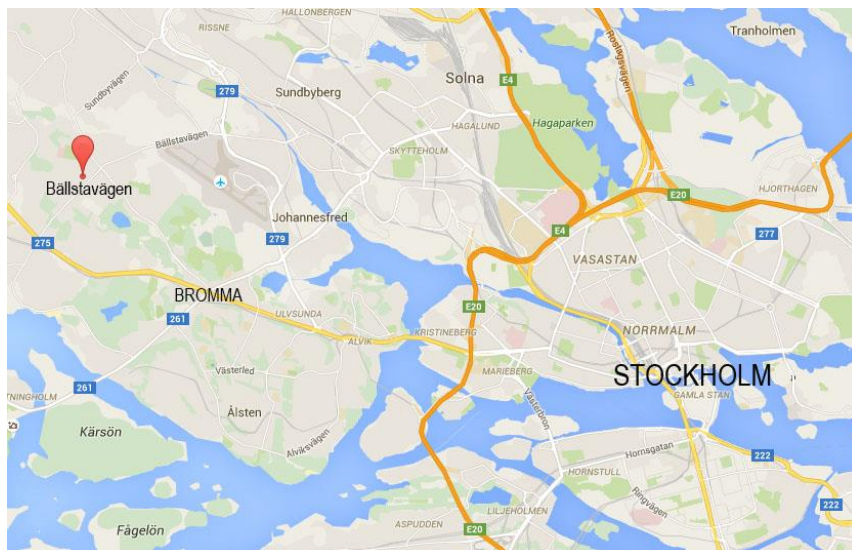
Mellan åren 1940-1970 var det vanligt att bygga flerbostadshus med murverkskonstruktioner liknande referensobjektet. Exempel på detta beskrivs av Björk, Kallstenius, och Reppen (2002, s. 92-107). Stommen byggdes ofta av lättbetong, lecablock och tegel i olika kombinationer, som nämndes i föregående stycke. I ytterväggar byggda med lättbetong fungerade lättbetongen som isolering. Ingen eller endast ett tunt lager mineralull eller motsvarande användes i dessa fall. Björk et al. ger exempel på ett punkthus med tre våningar, liknande referensobjektet, med yttervägg av tjocka lättbetongblock och bärande mellanväggar av 1-stens tegel. Referensobjektets ytterväggsuppbyggnad med lättbetong och fasadtegel fäst med kramlor återfinns på övre våningsplan på ett loftgångshus (Björk et al., 2002, s.92). Även andra delar av referensobjektets uppförande, såsom balkonginfästning och planlösning, återfinns ofta. Det motiverar att referensobjektet är representativt för likande byggnader från samma tidsperiod, vilket gör arbetets resultat användbara för motsvarande konstruktioner.

3.2 Referensobjekt Beckomberga

En fallstudie har gjorts på ett referensobjekt. Byggnaden anses representativ som tidstypiskt flerbostadshus från 60-talet.

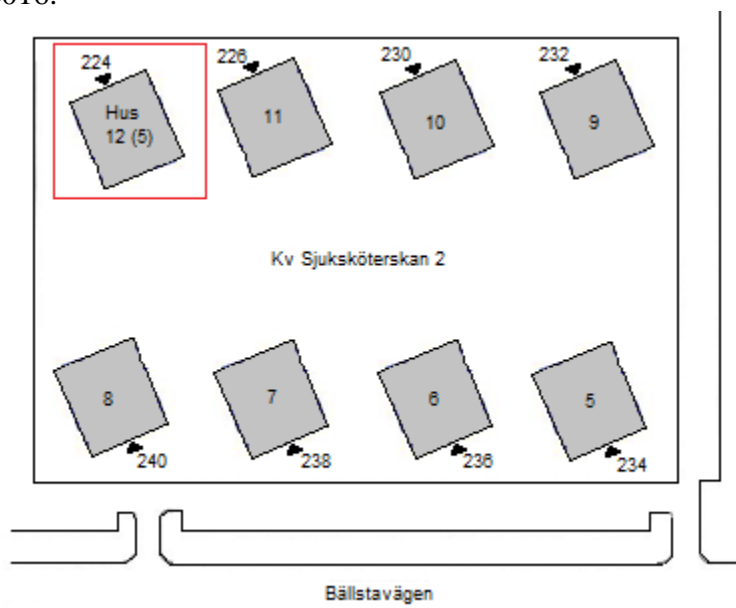
3.2.1 Geografiskt läge

Läget för referensobjektet visas i Figur 5.



Figur 5. Läge för referensobjekt, Beckomberga (Google Maps, 2016).

Referensobjektet ägs av Stockholmshem AB och är ett av åtta flerbostadshus i kvarteret Sjuksköterskan 2. Kvarterets samtliga åtta hus är punkthus i fyra våningar, byggda samtidigt i slutet av 60-talet. Byggnaderna i kvarteret har i princip samma konstruktion men deras form och planlösning skiljer sig något. Som referensobjekt har hus nummer 12 valts, markerat med rött i Figur 6. På originalritningarna benämns dock huset som nummer 5. Ett besök i byggnaden och två lägenheter gjordes i april 2016.



Figur 6. Situationsplan för kvarteret Sjuksköterskan 2. (Stockholmshem AB, 1991). Omarbetad med tillstånd.

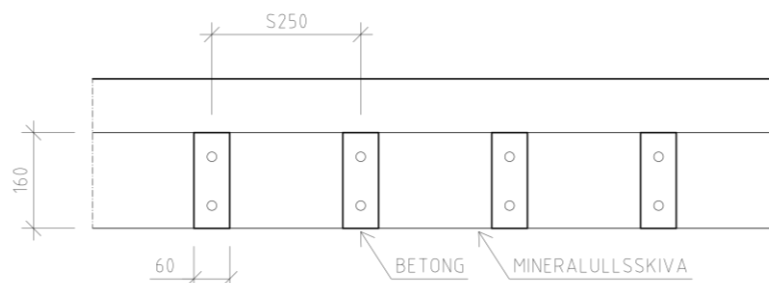


Figur 7. Fasadfoto. Författarnas egen bild.

3.2.2 Konstruktion

Byggnad nummer 12 har källare och fyra våningsplan med fyra lägenheter per plan. Stommen består av murad lättbetong med tjockleken 250 mm. Teglet är av svenskt standardformat, 250x120x62 mm (l x b x h) och är fäst i lättbetongen med rostfria kramlor, 4 st./m² vägg. Över fönster och andra öppningar har lättbetongbalkar använts för att stabilisera. Invändigt är väggarna beklädda med 13 mm tjocka gipsskivor, vilket noterades på plats och togs med i beräkningarna.

Balkonger finns på plan 1-3. Ytterväggarna kring balkongerna är icke-bärande väggar, bestående av 200 mm mineralull och träreglar med centrumavstånd cirka 400 mm. Utvändigt är regelväggen klädd av fasadskiva av fibercement, invändigt är den klädd med gipsskiva. Infästning av balkongplattor sker med genomsläpp av betong och armering med isolering dem emellan, se sektion C-C i Figur 8 nedan. Balkongerna åtskiljs av skärmväggar, fästa i balkongplattan. På plan tre sticker vindsbjälklaget ut och utgör ett tak ovan balkongerna.



Figur 8. Sektion C-C, genom balkonginfästning enligt Figur 12.

Källarväggarna är av platsgjuten betong som är 280 mm tjock och isolerar gör 50 mm stenullskiva. Grundplattan består av platsgjuten betong, är oisolerad och bärs i sin tur av pålar. Vid byggnation utjämnades marken med ett lager morän.

Taket lutar inåt med en varierande lutning på ungefär 1:30. Vattenavrinning sker genom invändig avvattning via fyra takbrunnar. Taket är beklätt med takpapp och omges av en sarg.

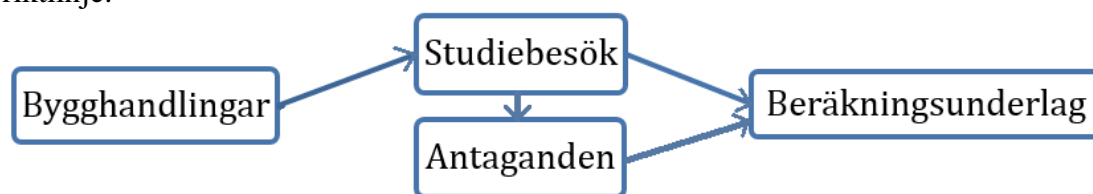
Bjälklagen bärs av 160 mm armerad platsgjuten betong. Det finns flera olika bjälklagstyper som varierar beroende på rumsfunktion och våning. Sand och kork har i vissa fall använts för ljudisolering och två masonitskivor fungerar som undergolvtäckning. Parkett och plastmatta dominerar som yttskikt.

3.2.3 Granskning av bygghandlingar

Här beskrivs de bedömningar och antaganden som gjorts vid granskning av handlingar kopplade till referensobjektet. Granskningen gav mått, material och uppbyggnad som användes som beräkningsunderlag. Handlingar till många byggnader inom Stockholms stad, inklusive referensobjektet, finns att tillgå på Stockholms Stads hemsida med hjälp av BankID. Vissa originalritningar finns i Bilaga 3.

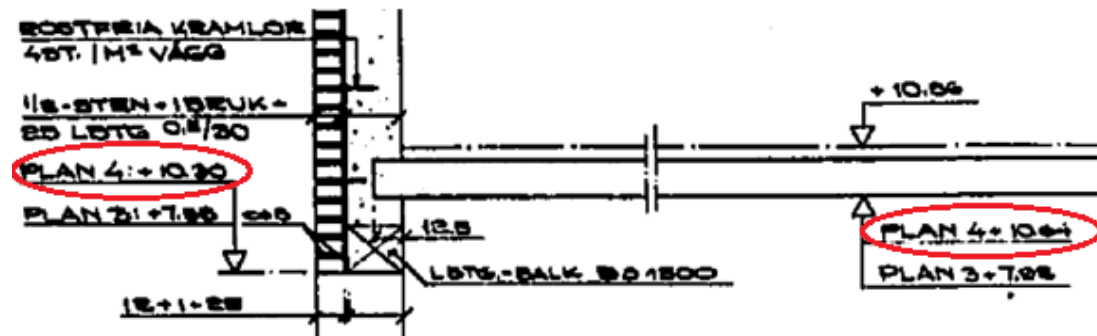
Ritningshantering utgjorde av flera anledningar en stor del av arbetet. De åtta byggnaderna som ingår i kvarteret byggdes samtidigt och delar ritningsunderlag, vilket innebär att vissa ritningar är generella för flera byggnader och andra är unika för en byggnad. Följaktligen blir det nödvändigt att kartlägga vilka handlingar som refererar till vilken byggnad och vad sektioner och detaljer föreställer. Det kräver förståelse i hur konstruktören byggt upp ritningar och förteckningar. Handlingarna är även svårlästa och märkta ”dålig förlaga”. Några handlingar har inte funnits tillgängliga, till exempel anslutningar och typer av dörrar och fönster.

Det kan vara avvikelse mellan originalritningar och verklighet. Ändringar kan ha skett både vid byggnationen 1970 och under byggnadens livslängd. Vid studiebesöket kontrollerades och kompletterades den information som hämtats från handlingarna. När information inte kunnat hämtas varken från handlingar eller vid studiebesök har antaganden gjorts, både med hjälp från handledare och med egna kunskaper. För att få fram aktuellt beräkningsunderlag har processen beskriven i Figur 9 fungerat som riktlinje.



Figur 9. Process för att få ut beräkningsunderlag.

Nedan följer en grundläggande introduktion till handlingarna. Idag anges mått i millimeter, men måtten på ritningarna är angivna i centimeter, undantaget höjder som är angivna i meter. Regelmått anges på ritningarna i tum. Det vanligaste måttet på träreglar är 2”x 4”, motsvarande 50x100 mm ohyvlat virke, som var vanligare förr. Dagens motsvarighet är hyvlat virke med mått 45x95 mm. Teglets måttsättning utgår från standardstorlek på tegelstenar, 250x120x62 mm (l x b x h). Med ½ sten menas således kortsidans mått, 120 mm. Höjdsystemet i handlingarna kan användas i de fall höjder och dimensioner inte är utsatta. Exempelvis blir avståndet från bjälklaget till nederkant på lättbetongbalken i Figur 10 nedan $10,64 - 10,30 = 0,34$ m. Nollnivån i ritningarna ligger vid färdigt golv på källarplan.



Figur 10. Referenshöjder i originalhandlingarna samt redovisning av tegelstensmått. (Stockholmskem AB, 1966). Omarbetad med tillstånd.

Återkommande förkortningar är vanligt förekommande i byggnadshandlingar, vissa mer självklara än andra. Vanliga förkortningar är exempelvis Galv (Galvaniserad), LBTG (Lättbetong), Min ull (Mineralull), Mont färd (Monteringsfärdig), Pl (Platta), Ramst (Ramstycke) och STU (Stenull).

Förutom tolkning av bygghandlingar har andra antaganden gjorts inför beräkningsunderlag. Då referensobjektet är en 46 år gammal byggnad, anses dräneringslagret vara otjänligt. Boverket menar att dräneringssystem har en livslängd på ca 30-50 år och därefter behöver åtgärdas (Boverket, 2007). I en artikel från Vi i villa hävdas också att cirka 30 år är en rimlig livslängd, men ifall dräneringen ligger i lera kan det medföra att den är otjänlig efter endast 15 år (Vi i villa, 2010). Ofta är det den kapillärbrytande förmågan som försämras då jord efterhand kontaminerar dräneringslagret, i synnerhet om lagren inte är åtskilda av en fiberduk.

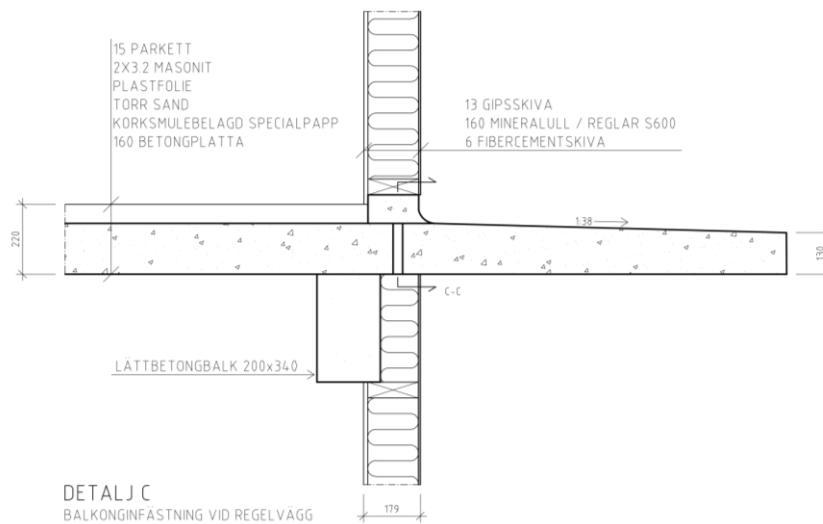
3.2.4 Urval av köldbryggor

När tillräcklig förståelse av byggnadens utformning uppnåtts påbörjades urvalet av köldbryggor. Målet har varit att resultaten ska kunna användas på andra liknande byggnader, vilket har tagits hänsyn till vid urvalet. Endast vanligt förekommande köldbryggor har valts och speciallösningar har undvikts såtillvida de inte ansetts bidra till stora värmeförluster. Exempel på vanliga köldbryggor är balkonginfästningar, takfötter, kantbalkar, ytterväggshörn och bjälklagsanslutningar.

Platser där många konstruktionsdelar möts på samma plats, likt Figur 11 och 12, har delats upp i olika fall för att inte av misstag räknas dubbelt. Detaljen i Figur 12 blir således dels en detalj med bjälklagsinfästning och en med balkonginfästning.



Figur 11. Möte mellan flera konstruktionsdelar- bjälklag, yttervägg, bärande innervägg, balkong. Författarnas egen bild.



Figur 12. CAD-ritning av sektion genom mötet på fotot ovan. För sektion C-C se Figur 8.

Det bör tas hänsyn till att detaljer kan skilja sig åt för en likande byggnad, som kan ha andra konstruktionslösningar än referensobjektet. Vid applicering på andra byggnader är det därför önskvärt att resultaten används som grund, men de kan behöva kompletteras. De köldbryggor som slutligen valts ut och hur de beräknas redovisas i Kapitel 4.

4 Beräkningar

Här beskrivs hur beräkningar har gjorts. Kapitlet inleds med en kort introduktion till beräkningsprogrammet och sedan beskrivs de förutsättningar och indata som använts vid beräkning av Ψ -värden. Därefter introduceras vilka köldbryggor som beräknats och hur de beräknats. I slutet av kapitlet beskrivs hur U -värden och andel köldbryggor beräknats. Med grundläggande kunskaper i COMSOL förstås kapitlet lättare.

4.1 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics är ett datorprogram med brett användningsområde som kan användas för att simulera fysiska situationer och fenomen. I det här arbetet är användningsområdet simulering av värmefflöde.

Programmet använder sig av FEM (finita elementmetoden). FEM är en numerisk metod som innebär att aktuell geometri delas upp i små geometrier kallade *finita element*, vanligtvis trianglar som tillsammans bildar ett nät, *mesh*. Trianglarna är i sin tur uppbyggda av nodpunkter och varje nodpunkt får en interpoleringsfunktion. Detta resulterar i höggradiga polynom som ger ett avancerat randvärdesproblem, vilket löses av datorn.

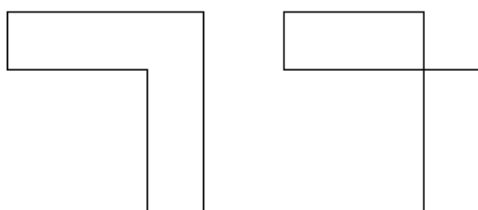
4.2 Beräkning av Ψ -värden

I detta avsnitt beskrivs stegvis hur beräkningsarbetet i COMSOL utförts, där målet är att beräkna de utvalda köldbryggornas Ψ -värden.

Praktiskt börjar arbetet i COMSOL Multiphysics 5.1 med att rita upp en beräkningsmodell bestående av två geometrier, det verkliga fallet och ett referensfall. Därefter definieras vilka material som geometrierna består av och respektive materials värmekonduktivitet (λ -värde). Randvillkor, som övergångsmotstånd inne och ute samt temperaturer anges sedan varpå en uträkning görs. Resultatet av beräkningen kan presenteras i form av bilder och tabeller eller plottas som diagram vilka visar värmefflöde, temperatur och annan relevant data. Även värmefflöde kan beräknas och användas för att få fram Ψ -värden.

4.2.1 Geometri

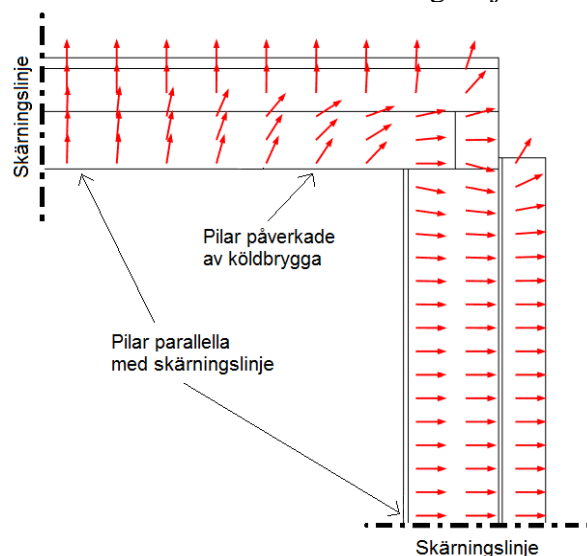
Utifrån ritningsunderlaget ritas en geometri upp som visar det faktiska utseendet på konstruktionen, här kallat *verkligt fall*. Geometrin delas upp i delytor efter vilket material det är. Därefter ritas en geometri som visar hur konstruktionsdelen skulle sett ut utan köldbrygga, hädanefter kallat *referensfall*. För att referensfallet ska vara jämförbart med verkliga fallet bör de två geometrierna ha samma utbredning. Figur 13 visar ett schematiskt exempel på *verkligt fall* och *referensfall* i form av ett hörn.



Figur 13. Verkligt fall och referensfall som båda ritas upp i COMSOL.

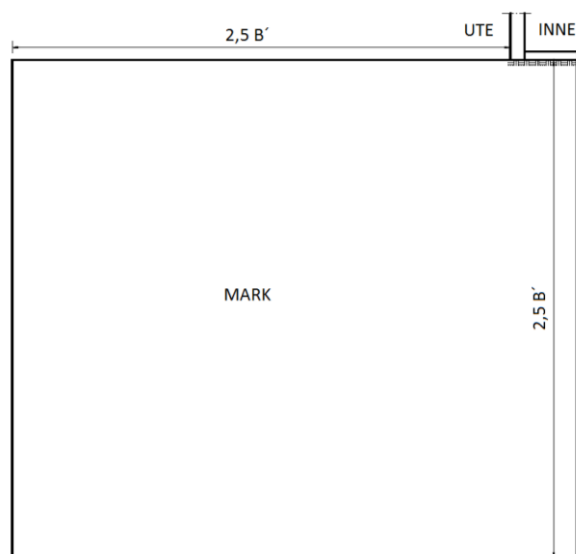
Nedan följer saker att beakta när geometrier ritas upp i COMSOL, exempelvis hur stor del av konstruktionen som behöver ingå i beräkningsmodellen och hur placering påverkar.

Hur stor del av geometrierna som ritas upp påverkar tillförlitligheten i slutresultatet. I SS-EN ISO 10211:2007 beskrivs detaljerat hur köldbryggor beräknas. Här beskrivs hur stor del av geometrin som behöver ingå i beräkningsmodellen. Modellen beskärs med skärningslinjer eller *Cut-off planes*, se Figur 14. För en vägg behöver avståndet från skärningslinjen till köldbryggan vara en meter. Att avståndet är tillräckligt kan även kontrolleras i resultatet genom värmeflödet, vilket kan symboliseras med pilar. Pilarna är inte parallella vid köldbryggan, däremot där köldbryggan inte påverkar värmeflödet och här sätts skärningslinjerna. Här är flödet endimensionellt.



Figur 14. Värmeflödet, illustrerat med pilar, påverkas inte av köldbryggan vid skärningslinjen.

Hur beräkningsmodellen för detaljer i anslutning till mark ser ut framgår i Figur 15. B' är bredden på byggnaden, som för referensbyggnaden i denna rapport är cirka 21 m. Markens utbredning är $2,5 B'$ från byggnaden, eller max 20 m (SS-EN ISO 10211:2007).

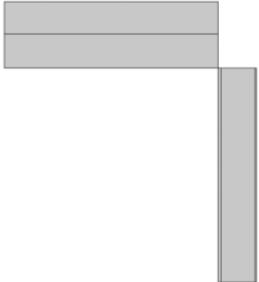
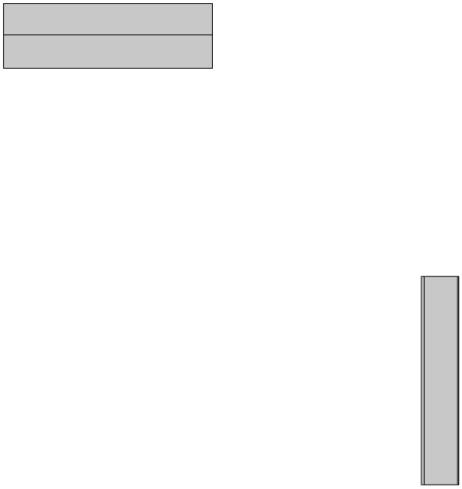


Figur 15. Markens utbredning är $2,5 B'$ eller max 20 m.

Köldbryggor som avgränsar till marken (Detalj A *Kantbalk i källare* och Detalj B *bjälklag ovan källare*, se Bilaga 1) har varit speciellt komplexa att rita referensfall till. Bristen på liknande exempel med källare från tidigare arbeten har varit en försvårande omständighet. Som komplement till SS-EN ISO 10211:2007 har Nybergs examensarbete ”Thermal bridges at foundations” används. Arbetet är tänkt som en guide för ingenjörer vid analys av värmeöverföring mellan byggnad och mark. Beräkningsgången för platta på mark beskrivs (Nyberg, 2001, s.57-59), men hur referensfallen ser ut vid källare framgår ej.

Det var oklart hur två geometrier påverkar varandra. I Tabell 3 görs en jämförelse i värmefflöde mellan att sätta två delar i referensfallet kant i kant respektive en meter ifrån varandra.

Tabell 3. Jämförelse mellan tak och vägg kant i kant respektive 1 m ifrån varandra.

	
$q_{\text{referensfall}} = 0,528542 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 0,528543 \text{ W/mK}$

Skillnaden på 0,0002 % anses försumbar. I COMSOL sätts två delar därför kant i kant, vilket blir mer överskådligt.

4.2.2 Material

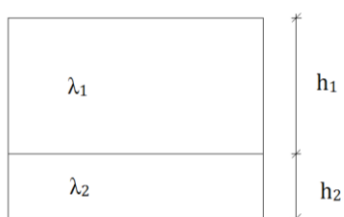
I COMSOL anges, efter att geometrin är angiven, vilka material konstruktionen består av. I detta avsnitt beskrivs vad ett materials λ -värde är och hur det kan försämrats över tid. De λ -värden som används i detta arbete redovisas i Tabell 4.

Varje material har ett specifikt λ -värde, som ofta anges av leverantören. Ur byggnadsteknisk synpunkt är det önskvärt med en låg värmeledningsförmåga, det vill säga ett lågt λ -värde, eftersom man vill behålla värmen i byggnaden. λ -värdet kan försämrats av olika anledningar, till exempel på grund av hög ålder hos materialet. Då referensobjektet byggdes för flera decennier sedan är det dessutom rimligt att anta att de byggnadsmaterial som användes inte har lika bra isoleringsförmåga som dagens byggnadsmaterial. Det är därför inte självklart att använda tabellerade värden.

Några materials λ -värden har modifierats med ingenjörsmässiga bedömningar enligt punktlistan på nästa sida.

- Mineralullens egenskaper kan förändras på lång sikt om byggnaden utsätts för hög temperatur eller hög fuktbelastning (Swedisol, 2016). Då det inte finns några uppgifter på att detta är aktuellt i referensobjektet har ett normalt λ -värde för mineralull satts.
- Material som inte påverkar värmeöverföringen märkbart har inte tagits med i beräkningarna. Detta gäller till exempel plastfolie, takstolar och yttertak (vilket är ett kalltak).
- All betong antas vara armerad, vilket ger upphov till ett något högre λ -värde på grund av att stål har betydligt högre värmeledningsförmåga än betong.
- Lättbetongs λ -värde är densitetsberoende. Värdet har interpolerats fram ($\rho=800 \text{ kg/m}^3$) (Kumaran, 1996, s.20-21).
- Tegel som är fuktmättat anses ha bättre förmåga att leda värme än torrt tegel. Fasadteglets λ -värde bör därför sättas högre och 0,7 användes istället för 0,6 W/mK för att vara på säkra sidan. Där materialet varierar utmed väggen, till exempel en tegelvägg med bruk mellan tegelstenarna, har ett λ -värde viktats fram enligt ekvation 1 nedan. Figur 16 förtydligar ekvationen.

$$\lambda_v = \frac{h_1 \times \lambda_1 + h_2 \times \lambda_2}{h_1 + h_2} \quad (1)$$



Figur 16. Viktning av λ -värde, förtydligande av ekvation 1 ovan.

De λ -värden som använts i denna rapport redovisas i Tabell 4 nedan. Värderna utan referens har tagits fram i samråd med handledare och med hjälp av antaganden ovan.

Tabell 4. λ -värden som används i beräkningarna.

Material	λ [W/mK]
Mineralull	0,04 (Petersson, 2009, s 497)
Armerad betong	1,9
Massivtegel	0,7 (Burstrom, 2008, s 50)
Cementbruk	1,6
Puts (bruk)	1 (Burstrom, 2008 s. 50)
Trä (furu, gran)	0,14 (Petersson, 2009, s 501)
Gipsskivor	0,22 (Petersson, 2009, s 501)
Lättbetong	0,5 (Kumaran, 1996, s.20-21)
Mark (sand, grus)	2 (Nyberg, 2011, s 29)
Golvspånskiva (masonit)	0,18 (Jernkontoret, 2016)
Fibercementskiva	0,18
Viktade material	
Tegelvägg	0,856
Mineralull med genomsläpp av betong	0,452

4.2.3 Randvillkor

I de COMSOL-beräkningar som gjorts i denna rapport har stationära förhållanden antagits, vilket innebär att ingen hänsyn tagits till temperaturförändringar över tid. Som nämnts tidigare används en beräkningsmall som kallas *heat transfer in solids*, vilket innebär värmeöverföring i ett fast material. Mallen innehåller förinställningar som påverkar randvillkoren. Endimensionell värmeöverföring genom ett fast material kan skrivas som ekvation 2 nedan.

$$Q = \lambda \times d \times \Delta T \quad (2)$$

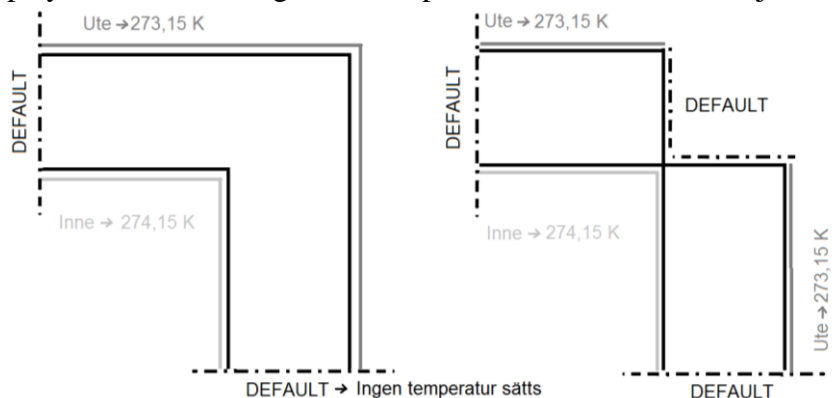
Q	Värmefflöde [W]
λ	Värmeledningsförmåga för aktuellt material [W/mK]
d	Materiallagrets tjocklek [m]
ΔT	Temperaturskillnad ($T_{\text{inne}} - T_{\text{ute}}$) [K]

De temperaturer som antagits är 273,15 Kelvin utomhus och 274,15 K inomhus, vilket motsvarar 0 °C respektive 1 °C. Detta ger ett jämförbart resultat eftersom $\Delta T=1$ och kan strykas från ekvation 2. Rätt q och därmed Ψ fås således direkt utan omräkningar och omvandlingar. Temperaturer räknas i Kelvin, då det är praxis. De kan likväl räknas i Celsius eftersom de har samma skala, men förskjutet med 273,15 K/steg. Vid användning av °C i datorprogram kan dock problem uppstå vid omvandling av negativa °C.

På skärningslinjer sätts ingen temperatur. Skärningslinjerna ska vara så kallade adiabatiska gränser, även kallade *default*. Det innebär att de är ogenomträngliga och helt utan värmeöverföring, det vill säga inget värmeutbyte sker. Adiabatiska gränser simuleras av COMSOL som ett material med enormt lågt λ -värde. Detta randvillkor sätts även på referensfallens kanter. Om istället en geometri ritas och manuellt ges ett lågt λ -värde blir resultatet detsamma. Felmarginalen blev 0,0007 % för de olika metoderna då det testades på Detalj A, vilket beror på att det inte går att sätta λ -värdet till exakt noll.

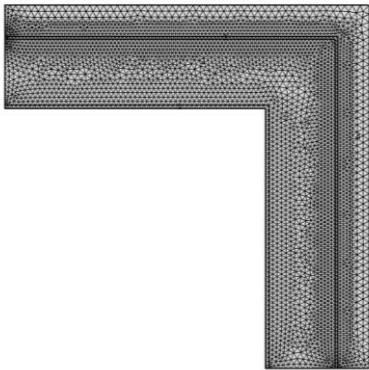
I COMSOL anges inre värmeövergångsmotstånd, *heat transfer coefficient*, till 8 W/m²K och yttre värmeövergångsmotstånd är 25 W/m²K. Det är de inverterade värdena till $R_{\text{si}} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ och $R_{\text{se}} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Figur 17 illustrerar hur givna temperaturer och värmeövergångsmotstånd appliceras på ytorna i det verkliga fallet respektive referensfallet. Varje fall beräknas var för sig.



Figur 17. Exempel på randvillkor som används på verkligt fall och referensfall för ett hörn.

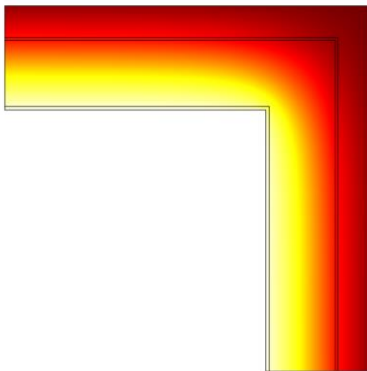
För att möjliggöra uträkningen appliceras *Mesh* som betyder nät, se Figur 18. Här delar COMSOL in geometrin i finita element enligt FEM. Här finns möjlighet att påverka noggrannheten av beräkningen. För ett så precist resultat som möjligt har det finaste nätet, *Extremely fine*, använts.



Figur 18. Innan uträkningen appliceras *Mesh*, som delar in geometrin i finita element.

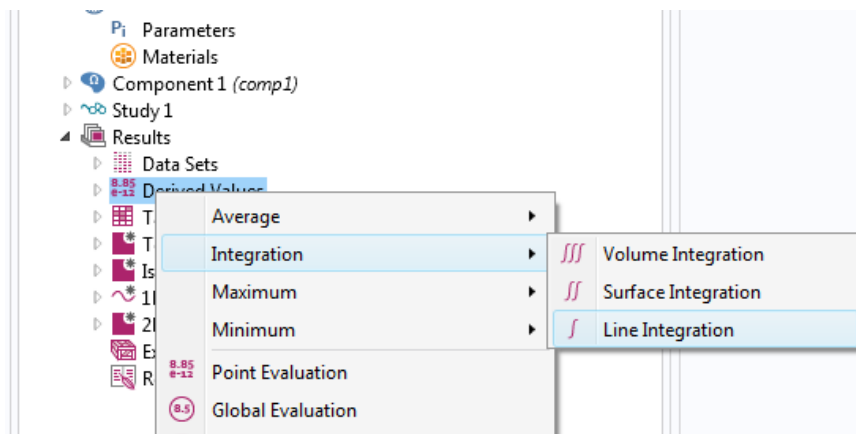
4.2.4 Uträkning

Kommandot *Study* ger slutligen modellernas temperaturfördelning. Nu går det att bekräfta om randvillkoren är korrekta. Resultaten ska visa kallare (röd färg) utomhus och varmare (vit färg) inomhus, enligt Figur 19.



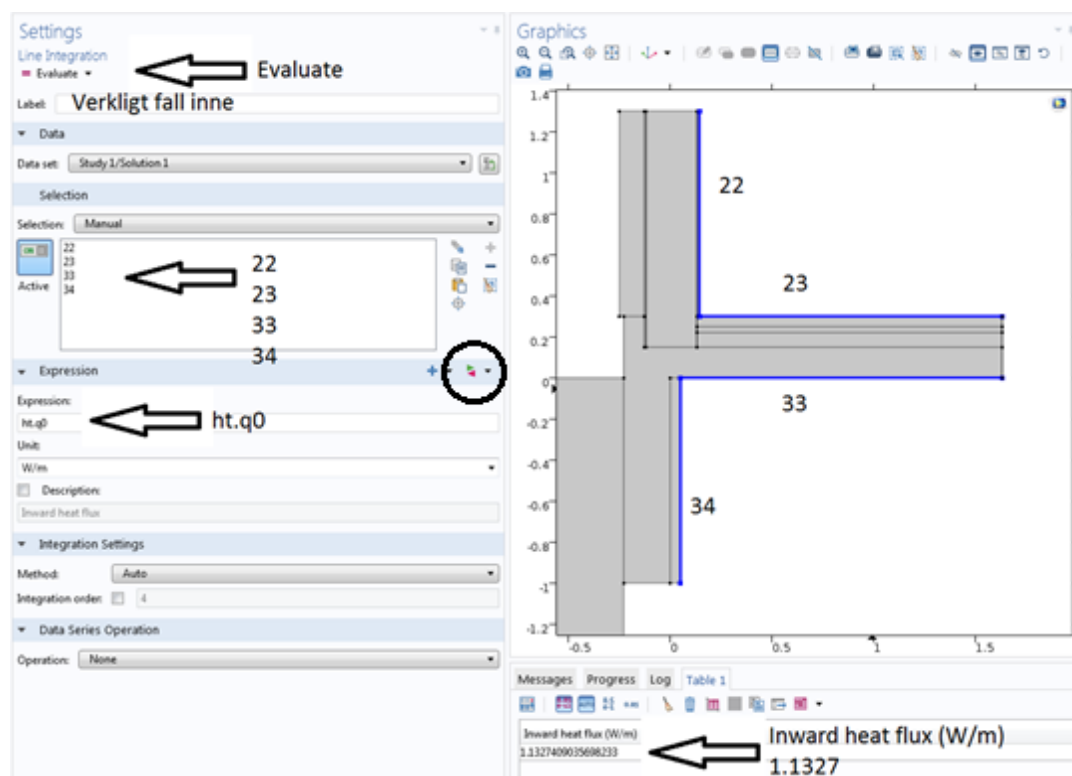
Figur 19. Resultat av uträkning.

I uträkningen, eller i COMSOL *Results*, kan värmeflödet q [W/mK] beräknas. För att beräkna värmeflödet $q_{\text{verkligt fall}}$ väljs *Line integration*, se Figur 20.



Figur 20. *Line integration* återfinns under *Derived values*.

De gränser på modellen som vetter mot insidan (22, 23, 33, 34) väljs och lämpligen namnges beräkningen exempelvis ”verkligt fall inne”, se Figur 21. Genom att välja insidan beräknas värmeflödet från insidan och ut, vilket ger positivt värde på q . Väljs utsidan blir resultatet samma fast negativt. Under *Line integration* skrivs kortkommandot för värmeflöde, *Inward heat flux*, $ht.q0$ [W/m] under *Expression*. Det går även att leta fram *Inward heat flux* och andra uttryck i menyn som finns inringad i Figur 21. Avslutningsvis ger *Evaluate*, uträkning, värdet på $q_{\text{verkligt fall}}$. Resultatet blir i det här fallet 1,1327 W/m. Detta förfarande upprepas för referensfallet och $q_{\text{referensfall}}$ fås ut.



Figur 21. Inställningar under *Line integration* för att beräkna värmeöverföringen.

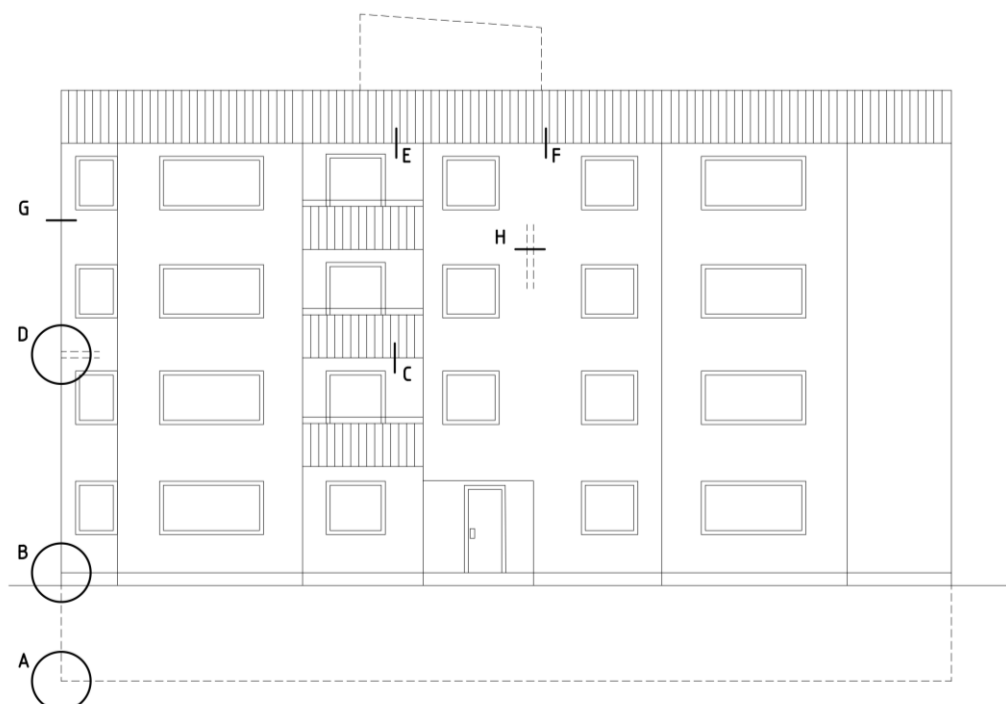
Under *Results* har *2D Plot Group* och *1D plot group* använts. Här finns en stor variation kring hur resultaten redovisas, såsom diagram, tabeller, temperaturfördelningar eller pilar som visar värmeflödet. I detta arbete används temperaturfördelningar för detaljerna i bilagorna.

Slutligen beräknas Ψ -värdet i Excel enligt ekvation 3 nedan. De sammanställda Ψ -värdena redovisas under Kapitel 5.1.

$$\Psi = q_{\text{verkligtfall}} - q_{\text{referensfall}} \quad (3)$$

4.3 Studerade detaljer

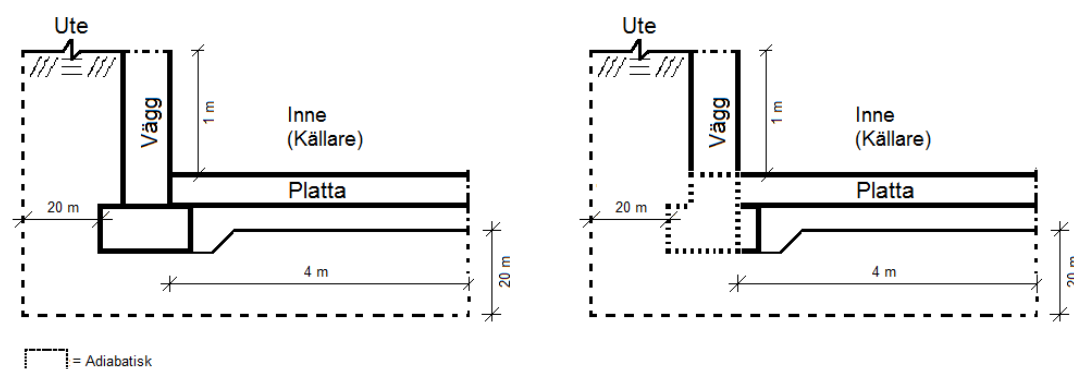
Här visas schematiska bilder och beskrivningar, i de fall de krävts, av de detaljer som beräknats. Det bör anmärkas att även material och uppbyggnad kommer att påverka resultaten. Detaljerna utgör köldbryggor och deras placering visas i Figur 22.



Figur 22. Placering av detaljerna A-H, som utgör köldbryggor och studerats i detta examensarbete.

Detalj A: Kantbalk i källare

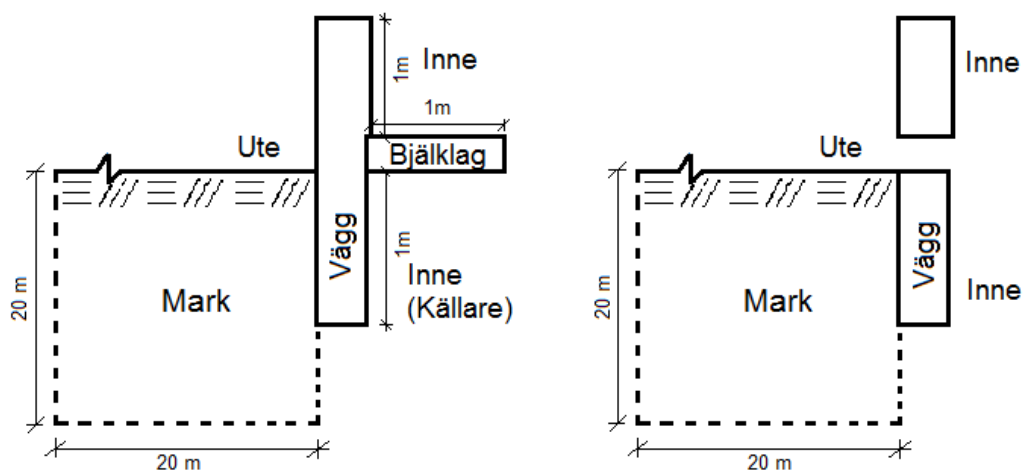
Det verkliga fallet motsvarar originalritningen. Där framgår att kantbalken är pålad, men det anses inte påverka beräkningsmodellen eftersom pålarna återfinns endast på ett visst c/c-avstånd. I referensfallet skapas en adiabatisk form som motsvarar köldbryggan. Den adiabatiska formen har λ -värdet nära noll eller så ritas här ingen geometri, se Figur 23.



Figur 23. Verkligt fall och referensfall för kantbalk i källare.

Detalj B: Bjälklag ovan källare

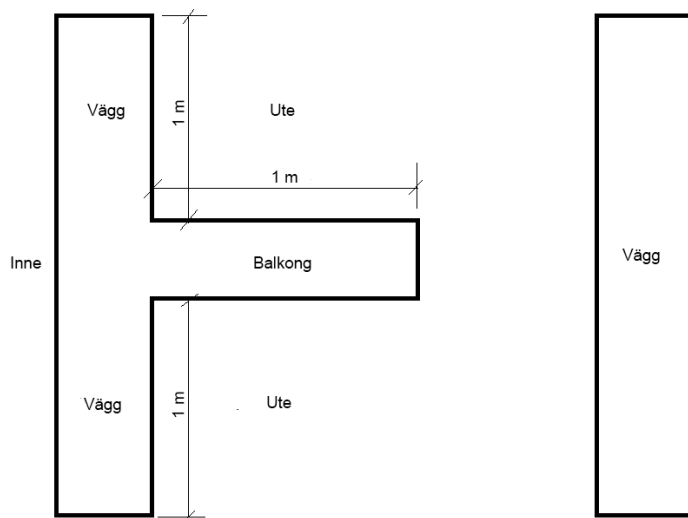
Referensfallet består av marken och källarväggen samt tegelväggen. Källaren är uppvärmd, så inget värmeutbyte antas ske över bjälklaget, som därför kan tas bort i referensfallet, se Figur 24. I det fall källaren skulle varit ouppvärmd skulle referensfallet sett annorlunda ut.



Figur 24. Verkligt fall och referensfall för bjälklag ovan källare.

Detalj C: Balkonginfästning

Referensfallet är en vägg av typen som finns vid balkongerna, se Figur 25.



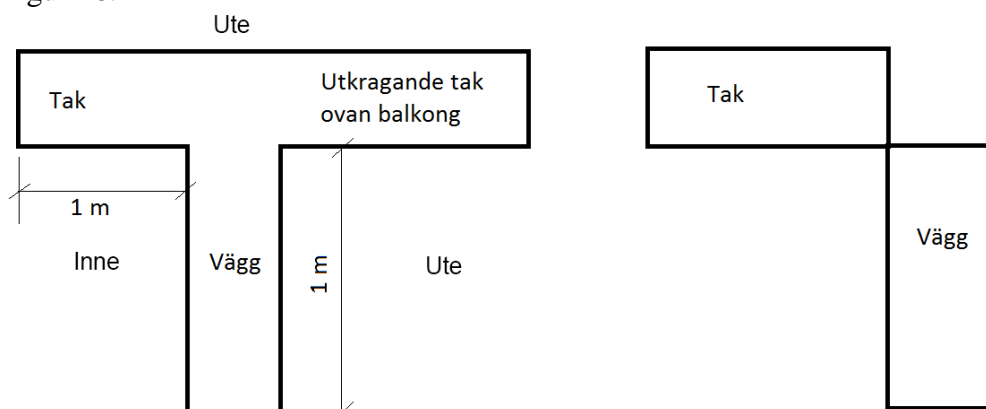
Figur 25. Verkligt fall och referensfall för balkonginfästning.

Detalj D: Bjälklagsinfästning

Referensfallet är en vanlig vägg utan bjälklag. Principen för referensfallet är densamma som för detalj C, se Figur 25.

Detalj E: Takfot vid balkong

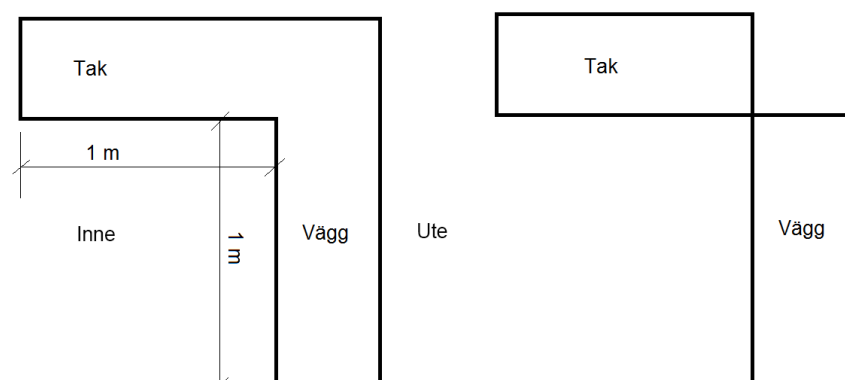
Eftersom det råder utomhustemperatur både ovanför och nedanför det utkragande taket så sker ingen transmission genom detta. Därför tas taket bort i referensfallet, se Figur 26.



Figur 26. Verkligt fall och referensfall för takfot vid balkong

Detalj F: Takfot

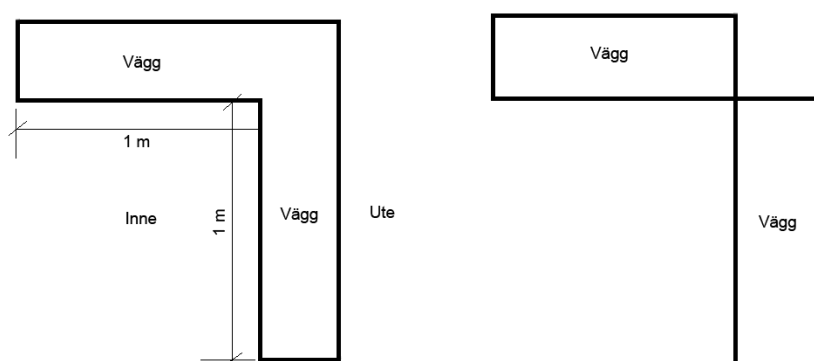
Verkligt fall och referensfall för takfot ritas enligt Figur 27.



Figur 27. Verkligt fall och referensfall för takfot

Detalj G: Ytterväggshörn

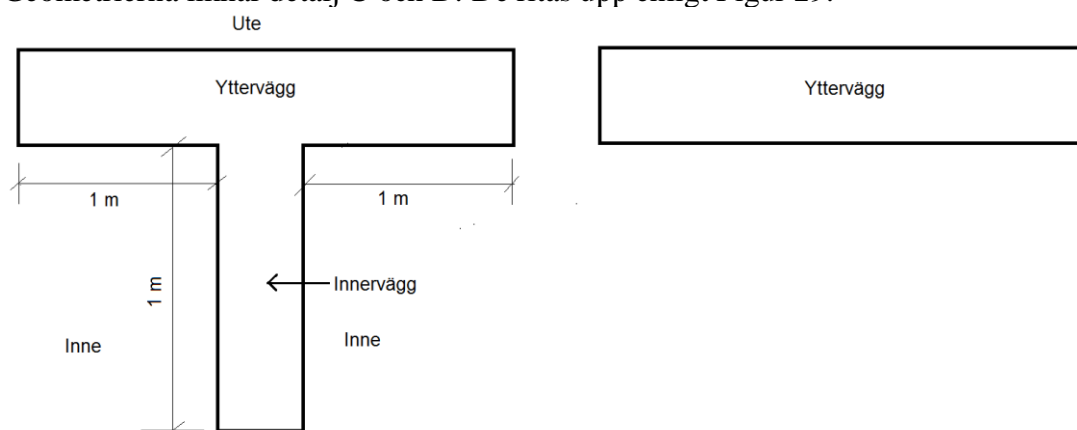
Hörnet syns ovanifrån. Inåtgående hörn ses inte som köldbryggor eftersom den invändiga arean är större än den utvändiga och har därför ej beaktats (Danebjer och Ekström, 2012, s. 30). Referensfallet är två väggar utan hörnbiten dem emellan, se Figur 28.



Figur 28. Verkligt fall och referensfall för ytterväggshörn

Detalj H: Bärande innervägg mot yttervägg

Geometrierna liknar detalj C och D. De ritas upp enligt Figur 29.

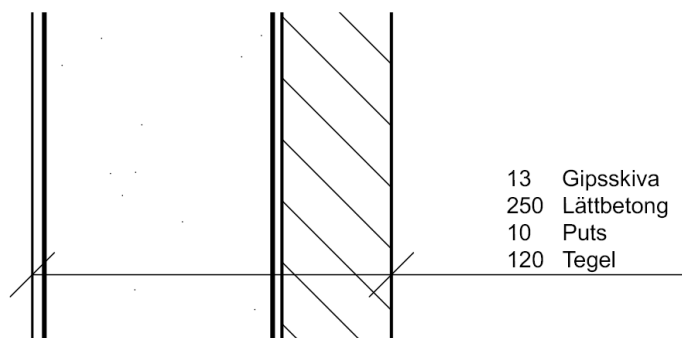


Figur 29. Verkligt fall och referensfall för innervägg mot yttervägg

4.4 Beräkning av U-värden

För att få ut ett genomsnittligt U-värde för byggnadens klimatskal har U-värden för samtliga konstruktionsdelar räknats ut. Detta har gjorts med handberäkningar, både λ -värdemetoden och U-värdemetoden. Som förenkling har en standardvariant av varje del definierats, se till exempel den vanligast förekommande väggen i Figur 30.

Beräkningarna redovisas i Bilaga 2 och resultatet sammanställs Kapitel 5.



Figur 30. Standardvägg i referensobjektet, uppbyggnad insida till utsida.

U-värden kan behöva korrigeras med avseende på konstruktion och arbetsutförande, se ekvation 4. I de fall källarväggarna är av lättbetong (referensobjektet har källarväggar av betong) ska exempelvis λ -värdet korrigeras för fuktig miljö, vilket i sin tur påverkar U-värdet.

$$U_{korr} = U + \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r \quad (4)$$

där

ΔU_f Korrektion för köldbryggor i form av fästanordningar etc.

ΔU_g Korrektion för arbetsutförande och springor och spalter.

ΔU_r Korrektion för nederbörd och vindpåverkan i omvända tak och duo-tak.

I Boverkets författningssamling (BFS 2011:6, s.154) redovisas hur en byggnads genomsnittliga U-värde, U_m [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] beräknas, se ekvation 5.

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i A_i + \sum_{k=1}^m l_k \psi + \sum_{j=1}^p \chi_j}{A_{om}} \quad (5)$$

där

U_i Värmegenomgångskoefficient för byggnadsdel [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

A_i Areal för byggnadsdelen i:s yta mot uppvärmd inneluft [m^2]. För fönster, dörrar, portar och dylikt beräknas A_i med karmyttermått.

Ψ_k Värmegenomgångskoefficienten för den linjära köldbryggan k [W/mK].

l_k Längden mot uppvärmd inneluft av den linjära köldbryggan k [m].

χ_j Värmegenomgångskoefficienten för den punktformiga köldbryggan j [W/K].

A_{om} Sammanlagd area för omslutande byggnadsdelars ytor mot uppvärmd inneluft [m^2]. Med omslutande byggnadsdelar avses sådana byggnadsdelar som begränsar uppvärmda delar av bostäder eller lokaler mot det fria, mot mark eller mot delvis uppvärmda utrymmen.

4.5 Beräkning av andel köldbryggor

Andel köldbryggor har beräknats enligt ekvation 6.

$$\text{Andel köldbryggor} = \frac{\sum \psi \times l_k}{\sum U \times A} \quad (6)$$

Värt att nämna om ekvation 5 och ekvation 6 är att alla mått mäts invändigt, det vill säga mot uppvärmd inneluft. Detta kan göra stor inverkan på resultatet vid beräkning av andel köldbryggor.

5 Resultat

I detta kapitel sammanställs alla resultat från beräkningarna. Det gäller Ψ -värden, U -värden, areor, längder och U_m -värde (genomsnittligt U -värde) från referensobjektet.

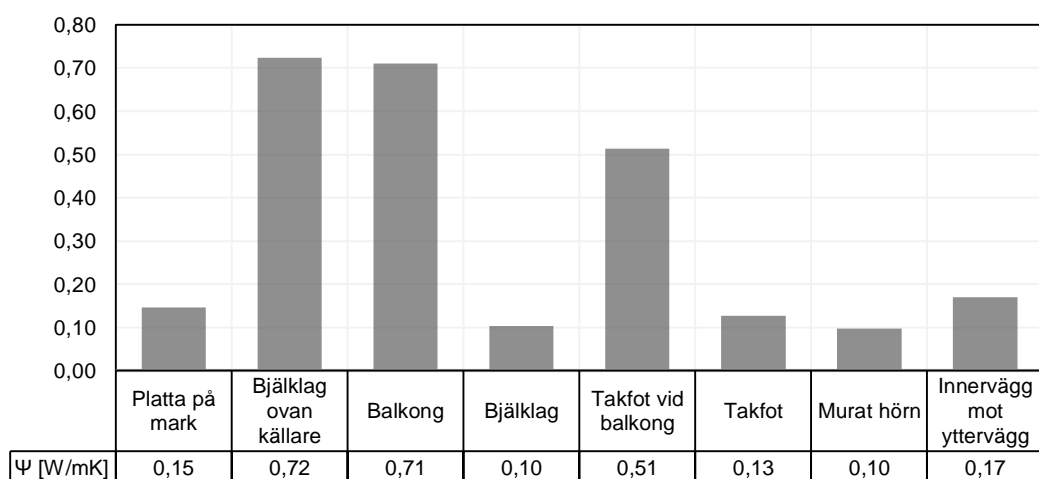
5.1 Resultat av Ψ -värden

Uträkningen härrör från ekvation 3. Ψ -värden anges ofta med tre decimaler men bedömning av indatans och resultatens tillförlitlighet gör att två decimaler redovisats, se Tabell 5.

Tabell 5. Sammanställning Ψ -värden

Detalj / köldbrygga	Verkligt fall $Q_{\text{verkligt fall}}$ [W/mK]	Referensfall $Q_{\text{referensfall}}$ [W/mK]	Skillnad Ψ [W/mK]
A Platta på mark	3,407	3,260	0,15
B Bjälklag ovan källare	2,096	1,372	0,72
C Balkong	1,312	0,602	0,71
D Bjälklag	1,808	1,705	0,10
E Takfot vid balkong	1,042	0,529	0,51
F Takfot	1,169	1,042	0,13
G Murat hörn	1,681	1,583	0,10
H Bärande innervägg mot yttervägg	1,875	1,705	0,17

I Figur 31 visas Ψ -värdena från Tabell 5 som ett diagram för att tydliggöra spridningen.



Figur 31. Ψ -värden för uträknade köldbryggor

5.2 Transmissionsförluster

U-värden och areor för klimatskalets delar redovisas i Tabell 6. Fönstren har antagits vara tvåglasfönster och deras U-värde har antagits $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Pettersson 2009, s 284). Dörrar har antagits ha samma U-värde som fönster. U-värdenas rimlighet jämförs med en väggkonstruktion med lättbetong, 100 mm isolering och tegelfasad som har $U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$. Då referensobjektets ytterväggar inte har någon isolering fås ett högre U-värde, $0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$, vilket anses rimligt. Vindsbjälklag jämförs med en kallvind med 170 mm skivisolering och $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Paroc, 2016). U-värdena multipliceras med respektive dels area och de summeras enligt ekvation 5 och då fås $\Sigma UA \text{ [W/K]}$.

Tabell 6. U-värden och areor för klimatskalets delar.

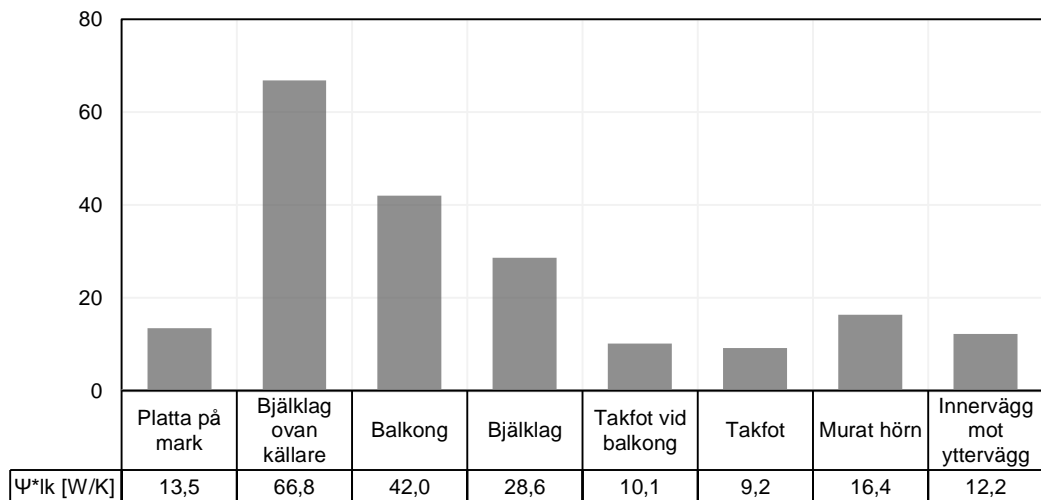
Del av klimatskal	U [$\text{W/m}^2\text{K}$]	A [m^2]	U*A [W/K]
Vägg	0,792	717	568
Tak	0,252	485	122
Grundplatta	3,442	485	1670
Fönster och dörrar	3	207	622
Summa Σ		1895	$\Sigma UA = 2983$

I Tabell 7 multipliceras Ψ -värdena med respektive längd enligt ekvation 5. Resultaten summeras och ger köldbryggornas totala värmeförlust $\Sigma \Psi * l_k \text{ [W/K]}$.

Tabell 7. Köldbryggornas Ψ -värden och längder.

Detalj / köldbrygga	$\Psi \text{ [W/mK]}$	Längd $l_k \text{ [m]}$	$\Psi * l_k \text{ [W/K]}$
A Platta på mark	0,15	92,2	13
B Bjälklag ovan källare	0,72	92,2	66,8
C Balkong	0,71	59,2	42,0
D Bjälklag	0,10	276,7	28,6
E Takfot vid balkong	0,51	19,7	10,1
F Takfot	0,13	72,5	9,2
G Murat hörn	0,10	168	16,4
H Innervägg mot yttervägg	0,17	72,0	12
Summa Σ		853	$\Sigma \Psi l = 199$

I Figur 32 visas resultaten från Tabell 7 i ett stapeldiagram.



Figur 32. Transmissionsförluster från referensobjektets köldbryggor, multiplicerade med sin längd [W/K].

Värmeförlusten från klimatskalet inklusive köldbryggorna, se tabell 6 och 7, blir:

$$\Sigma UA + \Sigma \Psi * l_k = 2983 + 199 = 3181 \frac{W}{K}$$

5.3 Resultat av U_m -beräkningar

När summan av värmeförluster från väggar, golv, tak, fönster, dörrar och köldbryggor i ekvation 5 divideras med A_{om} , som beräknas i Bilaga 2, blir kvoten den genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i A_i + \sum_{k=1}^m l_k \psi + \sum_{j=1}^p \chi_j}{A_{om}} = \frac{3181}{1895} = 1,68 \frac{W}{m^2 K}$$

5.4 Resultat av andel köldbryggor

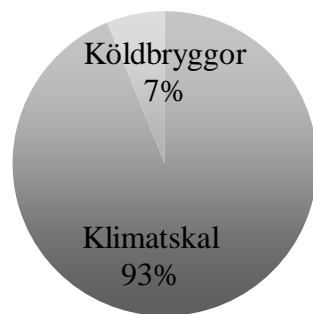
För att få ut procentsatsen köldbryggor divideras $\Sigma \Psi * l_k$ med ΣUA enligt ekvation 6:

$$\text{Andel köldbryggor} = \frac{\sum \psi \times l_k}{\sum U \times A} = \frac{199}{2983} = 1,0667$$

Således ger ett påslag av 6,7 % (1,0667) till ΣUA byggnadens totala värmeförlust i W/K.

$$2983 * 1,067 = 3181 \frac{W}{K}$$

Figur 33 visar resultatet av andelen köldbryggor i ett cirkeldiagram. 6,6 % avrundas till 7 %.



Figur 33. Procentuell fördelning av transmissionsförluster.

Som tidigare nämnts räknas inte punktformiga köldbryggor i rapporten. Även om dessa inte bedöms göra stor inverkan bör de tas hänsyn till. Dessutom kan en säkerhetsmarginal läggas till för att gradera eventuella beräkningsfel. 10 % köldbryggor bedöms vara en rimlig uppskattning för byggnaden.

6 Diskussion

Resultaten visar att andel köldbryggor är 10 % av ΣUA , klimatskalets transmissionsförluster. Resultaten visar även på höga Ψ -värden.

6.1 Tolkning av Ψ -värden

Resultaten av köldbryggeberäkningarna och köldbryggors Ψ -värden har jämförts med tidigare examensarbeten och litteratur, för att bedöma rimligheten, se Tabell 8.

Tabell 8. Jämförelse av Ψ -värden.

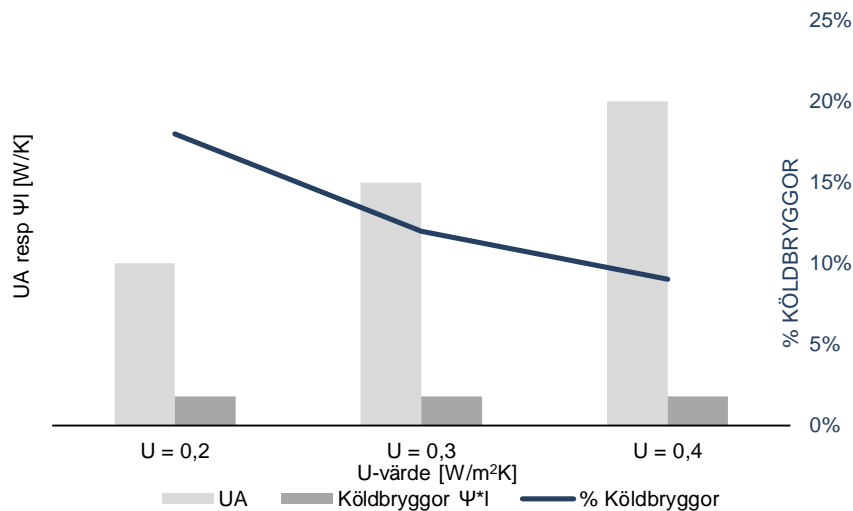
Ψ [W/mK]	(Petersson 2009, s. 279)	(Danebjer, Ekström 2012, s.61)	(Noremo, 2012)	Våra resultat
A Kantbalk	0,00-0,10	0,395	0,1785 (s.33)	0,15
B Bjälklag ovan källare				0,72
C Balkonginfästning	0,04-0,40	0,2		0,71
D Bjälklag		0,072		0,10
E Takfot vid balkong				0,51
F Takfot	0,02-0,06	0,092	0,0364 (s.37)	0,13
G Hörn	0,03-0,06	0,025		0,10
H Innervägg - yttervägg	0,01-0,04	0,027		0,18

I Tabell 8 sker jämförelsen mellan samma typ av detaljer, men olika lösningar och material. Tydligt är att Ψ -värdena har stor spridning. Flera köldbryggor beräknade i denna rapport är i storleksordningen tio gånger större. Det anses bero på att referensobjektet är byggt för cirka 50 år sedan och att många förbättringar gjorts sedan dess. Att detalj B, bjälklag ovan källare, har ett stort Ψ -värde, större än balkongen, kan ifrågasättas. Det har inte heller hittats något exempel att jämföra med. Rimligtvis borde värdet matcha en vanlig bjälklagsinfästning bättre. Oklarheter kring hur köldbryggor räknas vid källare kan förklara detta.

På grund av spridningen, och att nyare lösningar har lägre Ψ -värden, är det missvisande att använda tabellerade Ψ -värden som beräkningsmetod. Det kan endast göras med vetskap att Ψ -värdet härrör från en liknande konstruktionslösning. Med den vetskapen är tanken att U-värden och Ψ -värden ska kunna utgöra ett underlag för energibalansberäkningar i IDA eller VIP-energy. Detta både för referensobjektet och liknande byggnader.

6.2 Tolkning av andelen köldbryggor

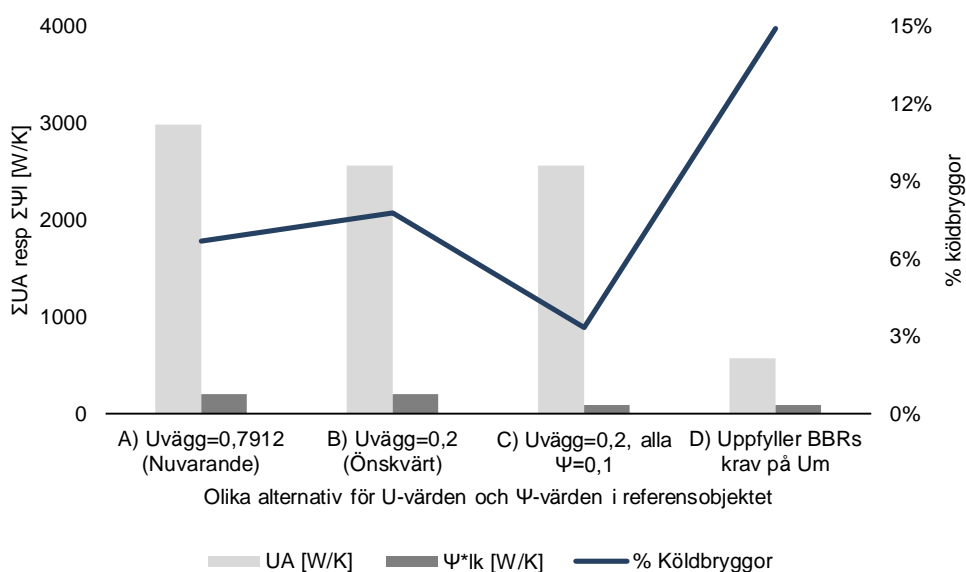
Resultatet 10 % köldbryggor är lägre än tidigare föreslagna schablonpåslag. En bidragande anledning är att klimatskalet har höga U-värden. Detta inverkar på hur stor andel av UA som köldbryggorna ($\Psi \cdot l$) utgör. Om U-värdet på en byggnadsdel visar sig vara högre, men köldbryggornas inverkan är konstant, blir procentpåslaget från köldbryggorna lägre, se Figur 34 på nästa sida. Detta problem behandlades i Kapitel 2.3, där problemet med lågenergihus är det motsatta, det vill säga att om U-värdet blir lägre blir procentpåslaget högre.



Figur 34. Hur andelen köldbryggor påverkas vid högre U-värden.

I Figur 34 har tre exempel (ej kopplade till referensobjektet) på U-värden jämförts, där köldbryggornas inverkan är desamma i alla tre fall. Linjen visar % köldbryggor (Ψ^*) av UA och minskar ju högre U-värden klimatskalets delar har. Detta är viktigt att tänka på om byggnaden ska energieffektiviseras i framtiden, genom att till exempel tilläggsisoleras. Köldbryggorna ökar då vanligtvis, om åtgärder för att minska dem inte görs i samband med renoveringen.

Figur 35 illustrerar fyra alternativ (A, B, C, D) på kombinationer av U-värden och Ψ -värden. Det är ett test för att visa hur procentsatsen påverkas då U-värden och Ψ -värden förändras. Areor och längder härrör från referensobjektet. Även Ψ -värdena kommer från referensobjektet, förutom i alternativ C och D. Testet visar hur förbättrade U-värden och Ψ -värden påverkar andelen köldbryggor och slutligen byggnadens U_m -värde. Alternativ A är byggnadens data idag. Vid alternativ B har ytterväggarnas U-värde reducerats till 0,2 W/m²K, vilket ökar andelen köldbryggor. Alternativ C visar effekten då väggarnas U-värde är 0,2 W/m²K och alla köldbryggor förbättrats till det reducerade Ψ -värdet 0,1 W/mK.



Figur 35. Transmissionsförluster och % köldbryggor vid olika förslag på förbättringar av klimatskalet.

Efter uträkning ger dock alternativ C U_m -värdet $1,39 \text{ W/m}^2\text{K}$, fortfarande betydligt sämre än BBRs krav på $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, och dessutom en liten andel köldbryggor. Orsakerna är byggnadens grundplatta som idag har U -värdet $3,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, samt fönstrens höga U -värde. Alternativ D visar de åtgärder som krävs för att klara BBRs krav på U_m . Här är grundplattan och väggarnas U -värden $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ och fönstren byts ut till treglasfönster med U -värdet $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Då blir U_m -värdet $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Andel köldbryggor ökar då till 15 %, till följd av att väggarnas U -värde minskat markant. 15 % matchar föreslagna schablonvärden bättre. Köldbryggornas andel av U_A påverkas således mycket av både U -värden och Ψ -värden.

6.3 Metodens lämplighet

Metoden har varit väl lämpad för att uppnå målsättningen med arbetet. Nedan kommenteras platsbesöket på flerbostadshuset.

Trots att platsbesök kräver tid och resurser är det viktigt att kontrollera att förutsättningarna stämmer. I många fall är handlingarna bristfälliga eller saknas helt. I de fallen kräver ett eller flera mer rigorösa platsbesök. Under det andra besöket i Stockholm gjordes platsbesök för att se ifall ritningarna överensstämde med verkligheten. Detta tillvägagångssätt är vanligt förekommande. I detta fall kunde konstateras att byggnaden motsvarade ritningarna bra och endast ett par material behövde kontrolleras då information saknades. Ungefär samma resultat hade uppnåtts utan att göra platsbesöket, men utfallet hade likväl kunnat innebära en diskrepans mellan teori och verklighet, utan att vi i så fall vetat det.

6.4 Felkällor

Med två decimalers noggrannhet är resultaten representativa för liknande flerbostadshus. Felkällor behöver trots det nämnas. U -värdena för fönster och dörrar har antagits och punktformiga köldbryggor, som infästningarna ger upphov till, har ej beräknats. Detta bör vara en felkälla i resultatet, om än marginell.

För att undvika felkällor har olika varianter testats i COMSOL, vilket inte framgår i rapporten. Varianterna har provats för en bättre praktisk förståelse för programmet och hur resultatet påverkas. Det kan vara skillnad i värmeflöde beroende på referensfallets geometri, beroende på konstruktionsdelarnas längd eller avstånd geometrier emellan. λ -värden och material har även reviderats under arbetets gång, vilket påverkat Ψ -värdena i hög grad.

För de detaljer som ligger i anslutning till mark har, som tidigare nämnts, funnits få liknande beräkningar från tidigare arbeten och standarder. Bristen på publikationer och praxis på just köldbryggor härrörande källare förvånade oss och krävde en del handledning. Hur referensfallet här ritas upp finns ingen entydig lösning på och därför är det viktigt att redovisa beräkningsgången. Rapportens beräkningsmodeller är redovisade tydligt för att läsaren ska förstå hur de upprättats.

7 Slutsats

Resultaten visar att beräknade detaljer har relativt höga Ψ -värden, vid en jämförelse med Ψ -värden idag. Att referensobjektet är byggt för 46 år sedan, då energiåtgång inte reflekterades kring i så stor utsträckning, är en bidragande orsak till detta.

Det föreligger en risk att schablonvärden inte är överensstämmande med verkligheten. Resultatet från denna studie visar att andelen köldbryggor är 10 % av klimatskalets transmissionsförluster, räknade på ett tidstypiskt flerbostadshus från sent 60-tal. Även byggnadsdelarnas U-värden påverkar köldbryggornas andel på de totala transmissionsförlusterna. Ett schablonpåslag på cirka 20 % skulle alltså innebära ett för högt värde. Schablonvärden bör över huvud taget användas med försiktighet. Mer lämpligt är att räkna ut specifika Ψ -värden eller använda färdigräknade Ψ -värden anpassade för liknande konstruktioner, om sådana finns att tillgå.

Idag finns inget krav från BBR på hur stor del av U_m -värdet som får bestå av köldbryggor. För att köldbryggor ska beräknas oftare och anslutningar i konstruktioner förbättras, även vid ombyggnation, är sådana krav ett möjligt komplement.

7.1 Förslag till framtida studier

- En möjlig fördjupning är att beräkna energiåtgången för byggnaden (till exempel i IDA) och undersöka vilka åtgärder som krävs för att klara energikraven från BBR.
- Att genomföra en liknande studie på en tidstypisk byggnad från ett annat årtionde. På lång sikt finns önskemål kring ett bibliotek med uträknade köldbryggor.
- Undersöka vidare vilken praxis som råder för beräkning av köldbryggor härrörande källare under mark.

8 Referenser

- Berggren, O. (2014). *COMSOL Multiphysics: Ett energitekniskt analysverktyg vid numerisk simulering av köldbryggor och analys av fukt i konstruktionsdetaljer*. (Examensarbete, Umeå Universitet, Institutionen för tillämpad fysik och elektronik). Hämtad från <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:737575/FULLTEXT01.pdf>
- Berggren, B., & Wall, M. (2013). Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes- Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology. *Energy and Buildings*, 65, 331-339. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.021
- Boverket. (2007). *Instruktioner och definitioner till besiktnings-protokoll småhus*. Hämtad från http://www.boverket.se/contentassets/83d8355da8a64114b1c5ab87cc6105b6/instruktion_smahus_ver2.pdf
- Boverket. (2012). *Handbok för energihushållning enligt Boverkets byggregler– utgåva 2*. Hämtad från <http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2012/handbok-for-energi-hushallning-enligt-boverkets-byggregler.pdf>
- Boverket. (2014). *Under miljonprogrammet byggdes en miljon bostäder*. Hämtad från www.boverket.se
- BFS 2011:6 ändrad t.o.m. BFS 2015:3. *Boverkets byggregler: föreskrifter och allmänna råd*. Hämtad 18 mars, 2016 från <http://www.boverket.se/globalassets/vagledning/kunskapsbanken/bbr/bbr-22/boverkets-byggregler-bfs-20116-tom-20153>
- Björk, C., Kallstenius, P., & Reppen, L. (2002). *Så byggdes husen 1880-2000 : Arkitektur, konstruktion och material i våra flerbostadshus under 120 år*. Stockholm: Formas.
- Burström, P.G. (2008). *Byggnadsmaterial: Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper* (2:3 uppl.). Lund, Studentlitteratur.
- Danebjer, M., Ekström, T. (2012). *Köldbryggor i lågenergihus: Byggnadssystemens inverkan på transmissionsförluster* (Examensarbete, Lunds universitet, Institutionen för bygg- och miljöteknologi). Hämtad från <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/3159976>
- Ekonomifakta. (2016). *Energianvändning*. Hämtad från <http://www.ekonomifakta.se/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/Energianvandning/>
- Industrifakta AB. (2008). *Förnyelse av flerbostadshus 1961-1975*. Hämtad från http://www.eio.se/SiteCollectionDocuments/fornyelseavflerbostadshus1961_1975.pdf

- Isberg, J. (2011). *Vilka krav ska vi ställa på våra "färska" ingenjörer?* Bygg och Teknik, Volym (8), s.17-18. Hämtad från <https://issuu.com/byggteknikforlaget/docs/8-10/17>
- Isover. (2007). *IsoverBoken: Guide för arkitekter, konstruktörer och entreprenörer*. Hämtad från www.isover.se
- IVA, Sveriges Byggindustrier. (2016). *Klimatpåverkan från byggprocessen: En rapport från IVA och Sveriges Byggindustrier*. Hämtad från <http://www.iva.se/globalassets/rapporter/ett-energieffektivt-samhalle/201406-iva-energieffektivisering-rapport9-i1.pdf>
- Jernkontoret. (2016). *Värmeledningsförmåga och U-värden för olika material*. Hämtad från <http://www.energihandbok.se/konstanter/varmeledningsformaga-och-u-varden-for-olika-material>
- Kumaran, M.K. (1996). Task 3: Material Properties. (Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Volume 3) Leuven: K.U.-Leuven Belgium.
- Nilsson, B. (2015). *Finita Elementmetoden: En kort introduktion till teorin*. Hämtad från <http://dixon.hh.se/bertil/Kurser/Common/FEMgk/Notes/kompendiumA4.pdf>
- Noremo, T. (2012). *Skapandet av ett byggnadsfysikaliskt detaljbibliotek åt Byggnadskonstruktörer - Fokus på fukt- och värmestillstånd i köldbryggor* (Examensarbete, Högskolan i Gävle, Akademin för teknik och miljö) Hämtad från <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:534944/FULLTEXT01.pdf>
- Nyberg, H. (2011). *Thermal bridges at foundations: Evaluation of heat calculation methods* (Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering). Hämtad från <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/155743.pdf>
- Petersson, B.-Å. (2009). *Tillämpad byggnadsfysik*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Ström, P. (1988). *Köldbryggor i flerbostadshus byggda under 1950- och 1960-talen* (Examensarbete i Byggnadskonstruktion, Chalmers tekniska högskola, Avd. för Byggnadskonstruktion).
- Stockholmshem. (2016). *Om Stockholmshem*. Hämtad från <http://www.stockholmshem.se/Om-Stockholmshem/>
- Stockholms stad. (2016). *Rekordårsbebyggelse: Fasadtegel*. Hämtad från <http://stadsmuseet.stockholm.se/om-hus2/fasader/rekordarsbebyggelse/>
- Sweden Green Building Council. (2014). *Miljöbyggnad: Bedömningskriterier för nyproducerade byggnader*. Hämtad från <https://www.sgbc.se/docman/miljobyggnad-2014/442-2-2-141001-mb-nyproduktion-vers-141017/file>

Swedish Standards Institute. SS-EN ISO 10211:2007. Köldbryggor i byggnadskonstruktioner - Värmefflöden och yttemperaturer - Detaljerade beräkningar. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

Swedisol. (2016). *Mineralull - Prestanda & livslängd*. Hämtad från <http://www.swedisol.se/mineralull-prestanda-livslangd>

ViiVilla. (2010). *Dags att dränera?* Hämtad från <http://www.viivilla.se/gor-det-sjalv/dranering/dags-att-dranera/>

Wingård, G. (2009). *Metoder för köldbryggeberäkningar i designprocessen*. (Examensarbete, KTH, Institutionen för byggvetenskap). Hämtad från <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:423881/FULLTEXT01.pdf>

Figurer

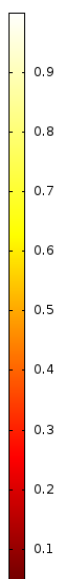
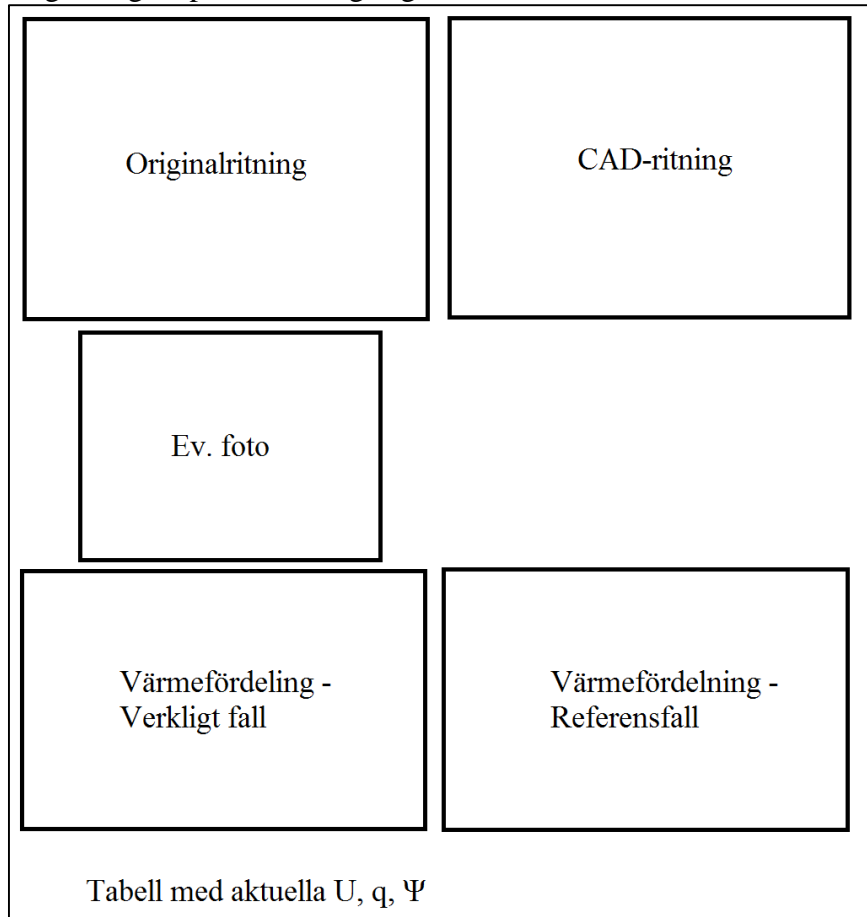
Google Maps. (2016). *Bällstavägen 224* [Karta]. Hämtad från www.google.se/maps

Stockholmskem AB (1991). *Situationsplan B: Kv Sjuksköterskan 2* [Ritning]. Hämtad från <http://extranet.stockholmskem.se>

Stockholmskem AB (1966). *07373541 Ritning - Sektion A80-H80 hus 1-8* [Ritning]. Hämtad från <http://insynsbk.stockholm.se/Byggochplantjansten/Startsida-ny/>

Bilaga 1: Studerade detaljer

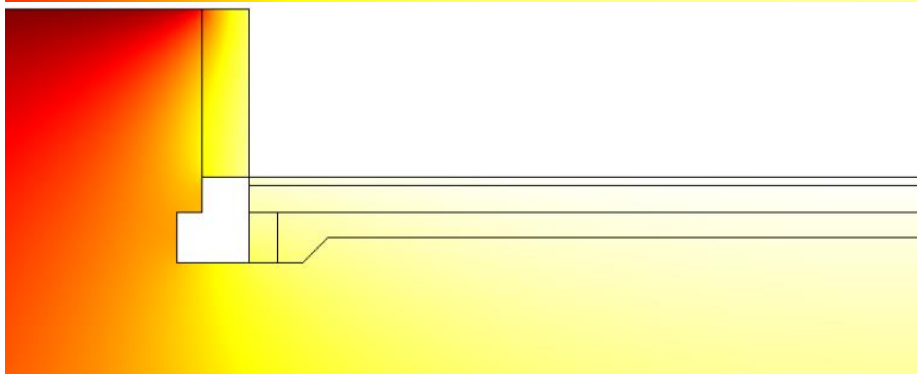
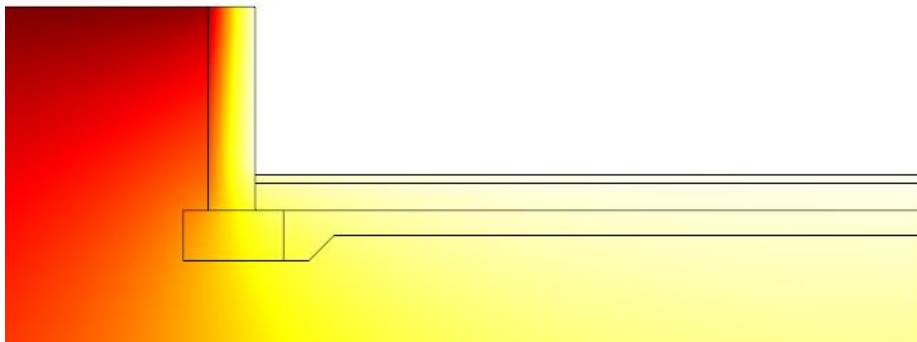
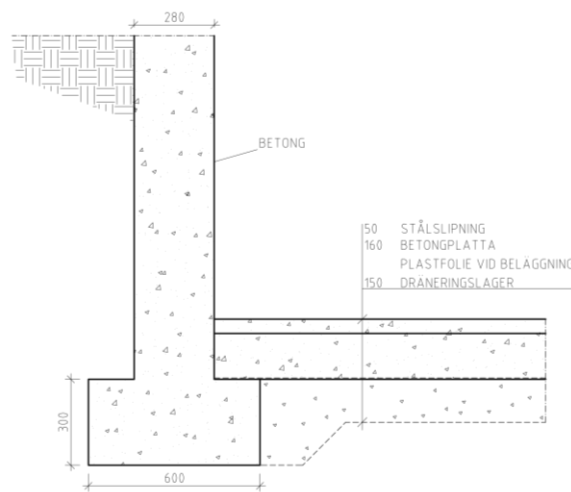
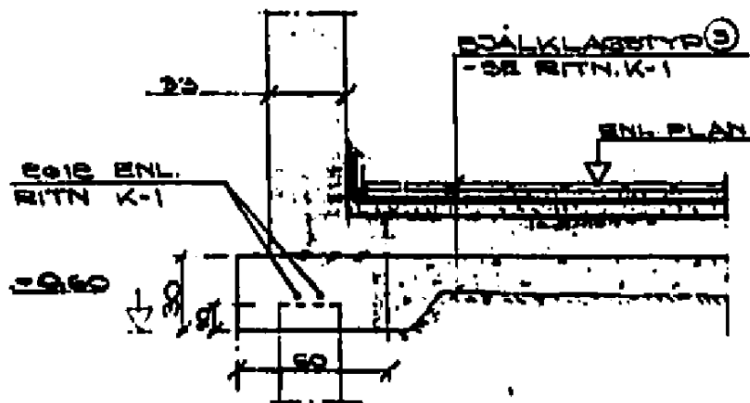
I Bilaga 1 redovisas de åtta detaljer, A-H, som studerats i projektet, se även Figur 20 för deras placering. Varje detalj har en originalritning, CAD-ritning för förtydligande och en bild som visar värmefördelningen i verkligheten respektive referensfallet. Foton finns på vissa detaljer. Sist redovisas q , Ψ -värde och relevanta U-värden. Ungefärlig disposition enligt figur nedan.



Skalan visar temperaturen [°C]

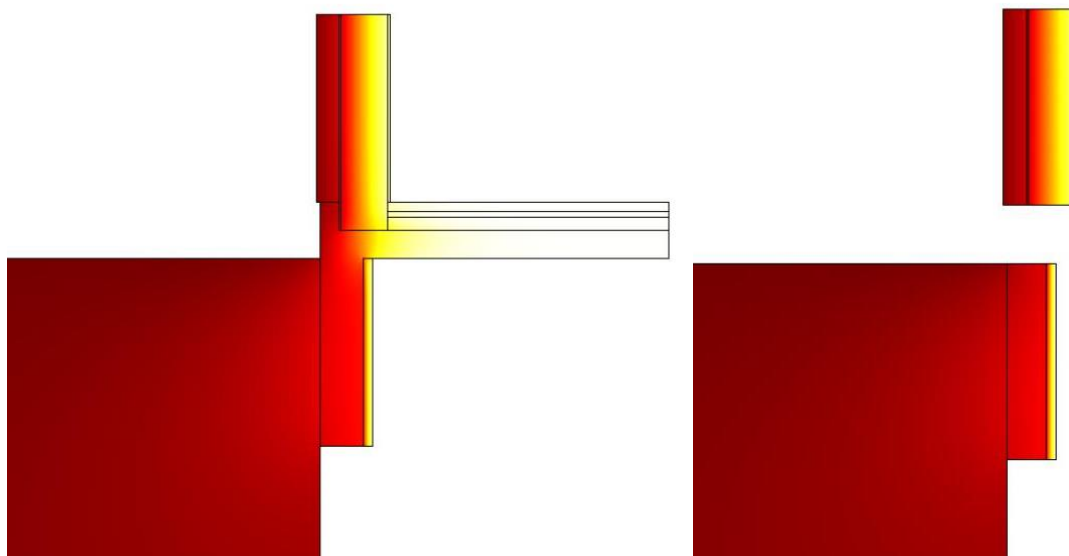
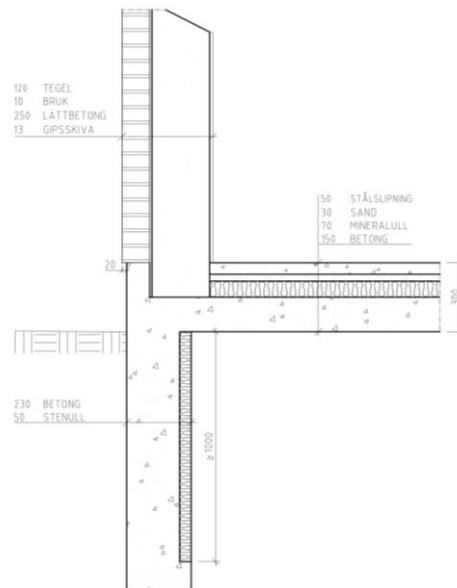
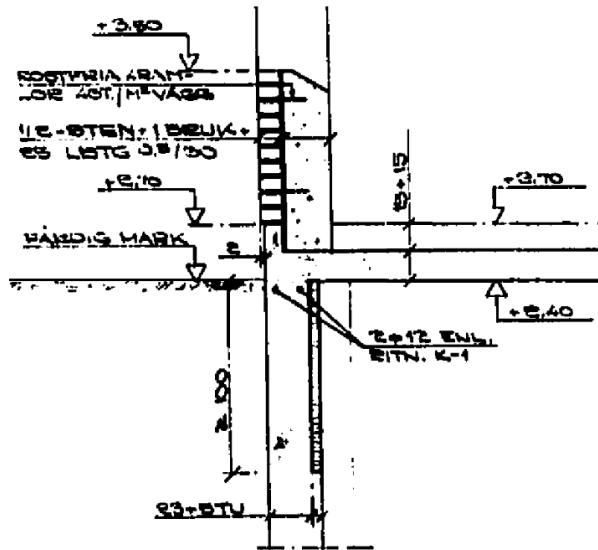
- Inomhus 1°C
- Utomhus (mark) 0°C.

Detalj A: Kantbalk i källare



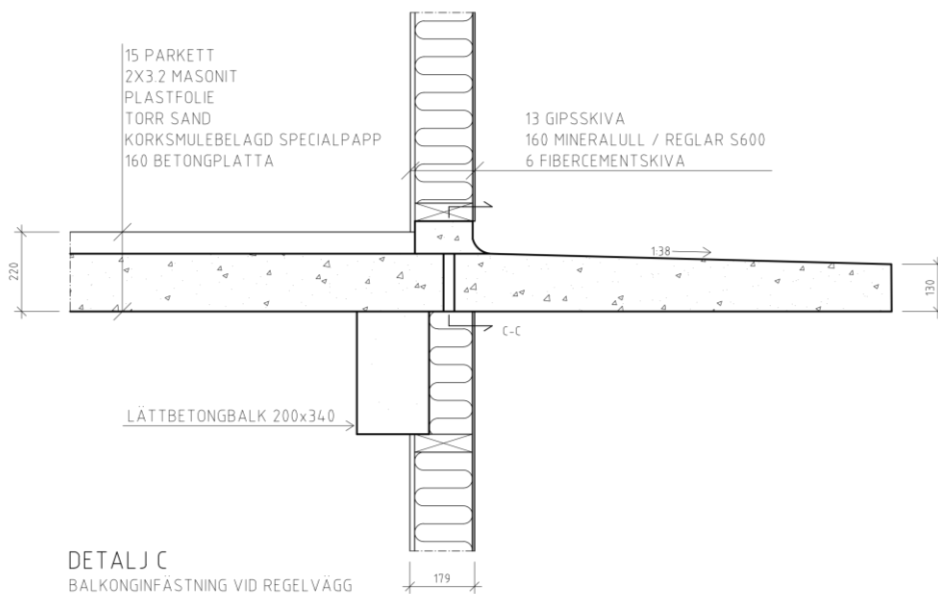
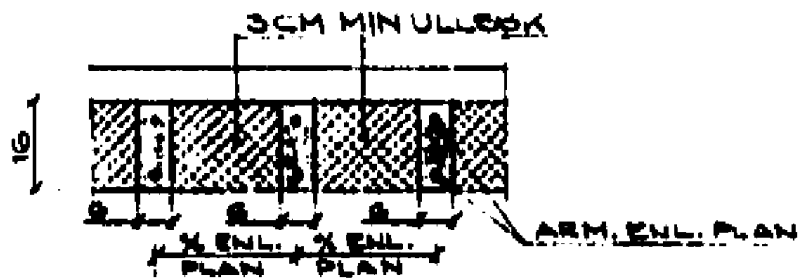
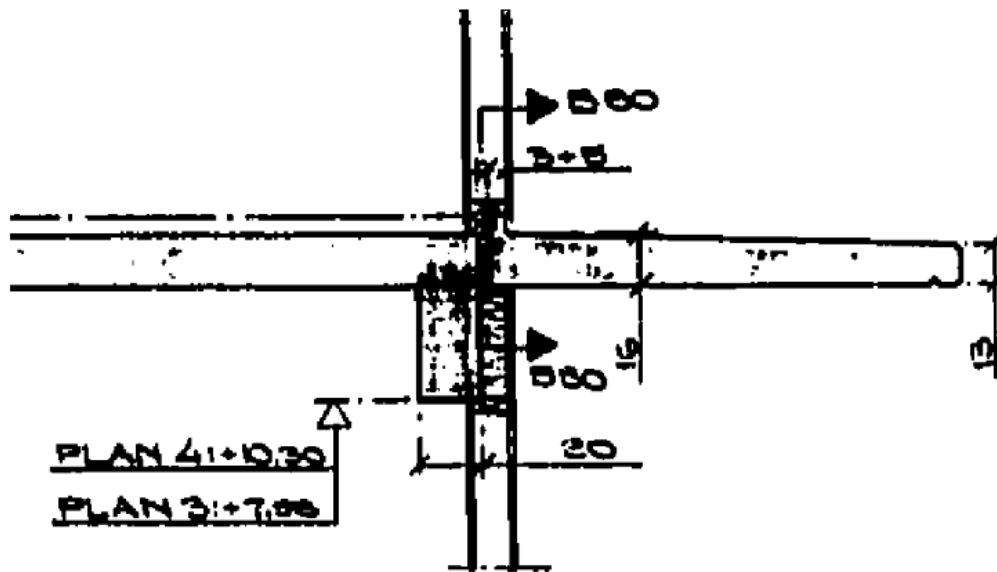
$U_{\text{platta}} = 3,442 \text{ W/m}^2\text{K}$	$q_{\text{verklighet}} = 3,407 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 3,260 \text{ W/mK}$	$\Psi = 0,15 \text{ W/mK}$
---	--	--	----------------------------

Detalj B: Bjälklag ovan källare

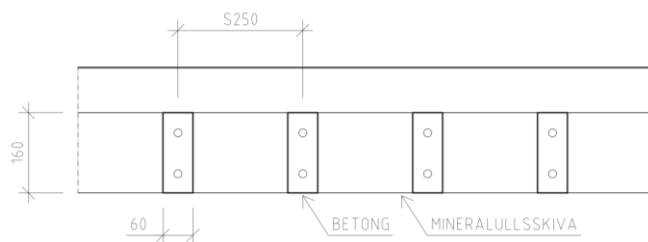


$U_{vägg} = 0,792 \text{ W/m}^2\text{K}$	$q_{\text{verklighet}} = 2,096 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 1,372 \text{ W/mK}$	$\Psi = 0,72 \text{ W/mK}$
--	--	--	----------------------------

Detalj C: Balkonginfästning

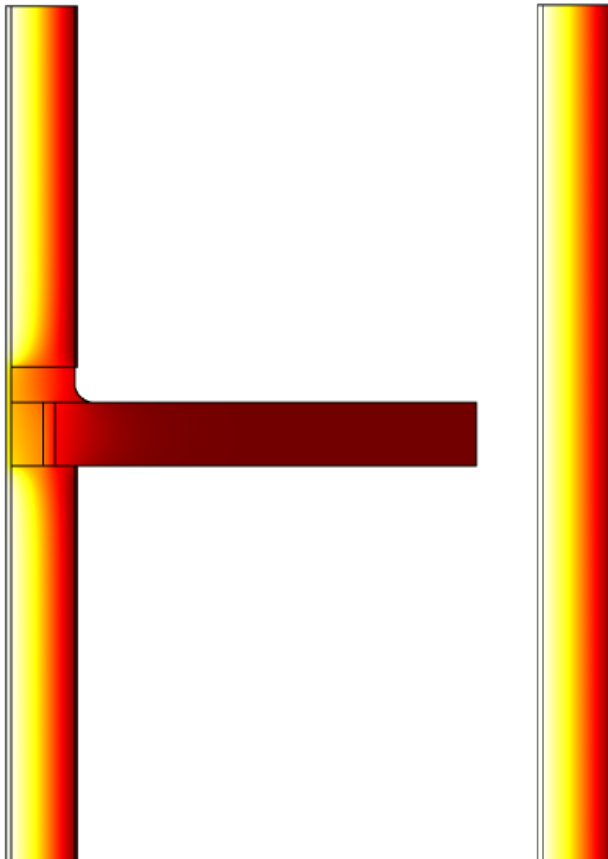


DETALJ C
BALKONGINFÄSTNING VID REGELVÄGG



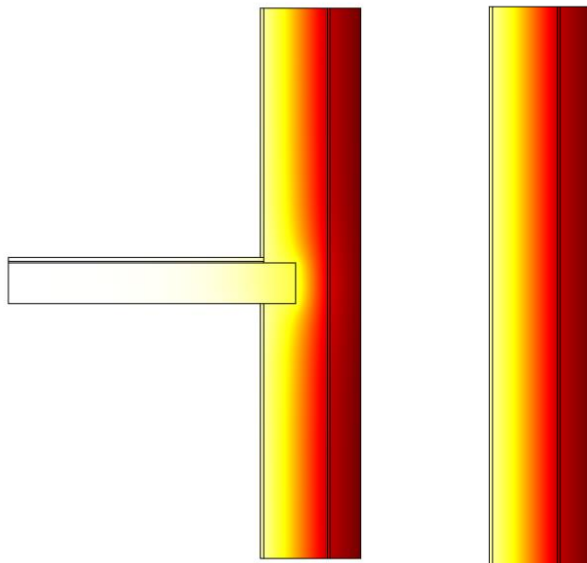
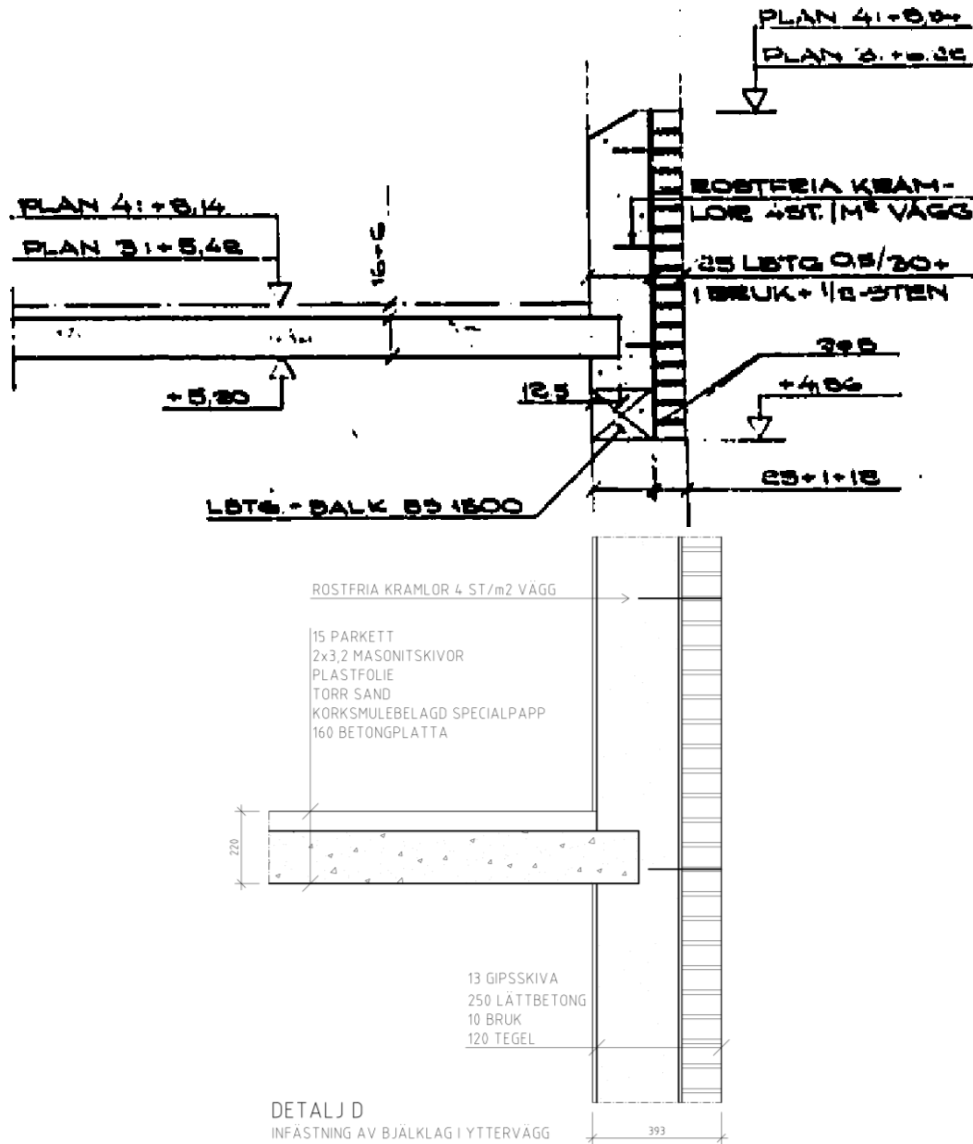
SEKTION C-C
GENOMSLÄPP AV BETONG MED ISOLERING MELLAN

$$\lambda_v = 0,452 \text{ w/mK}$$



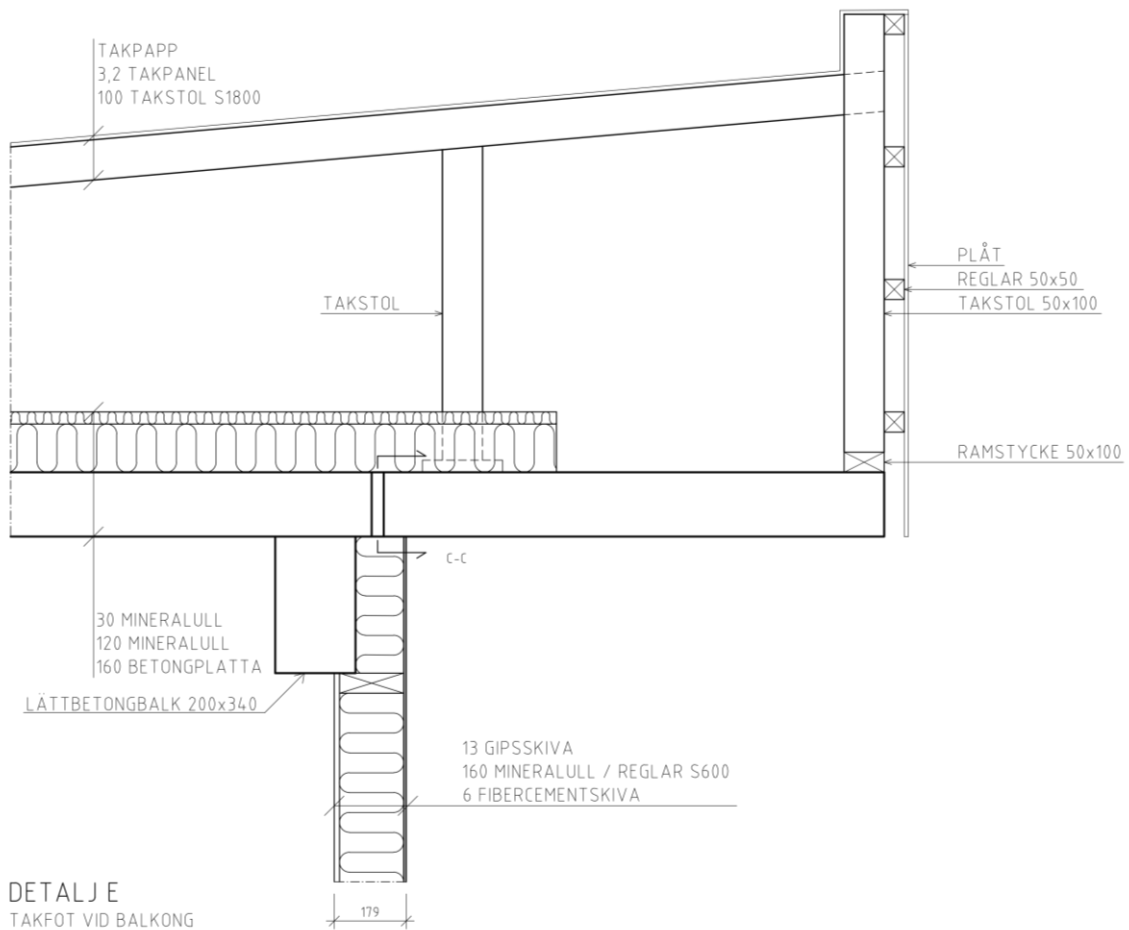
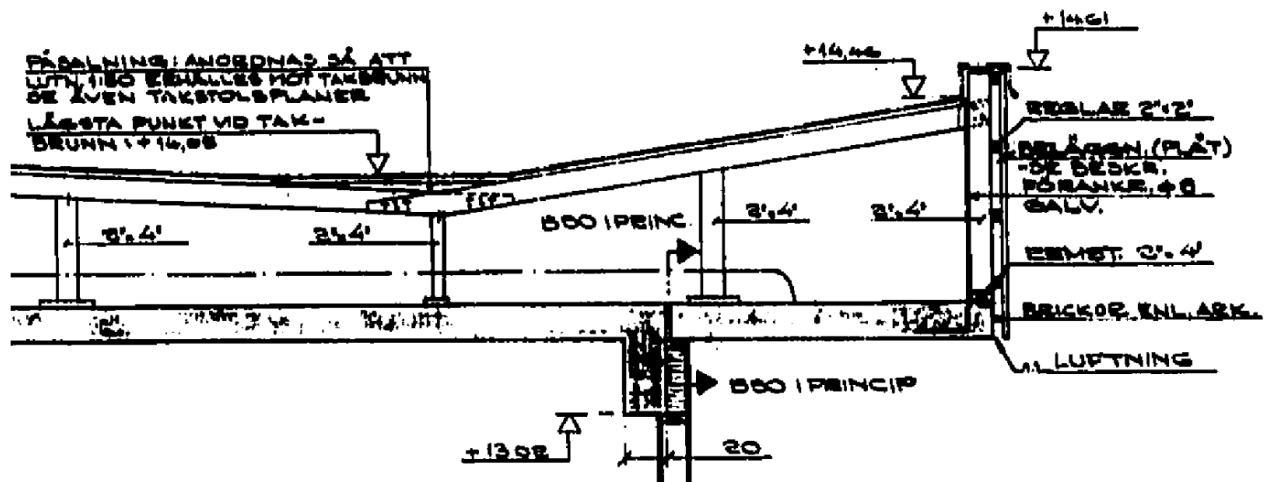
$q_{\text{verklig}} = 1,312 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 0,602 \text{ W/mK}$	$\Psi = 0,71 \text{ W/mK}$
---	--	----------------------------

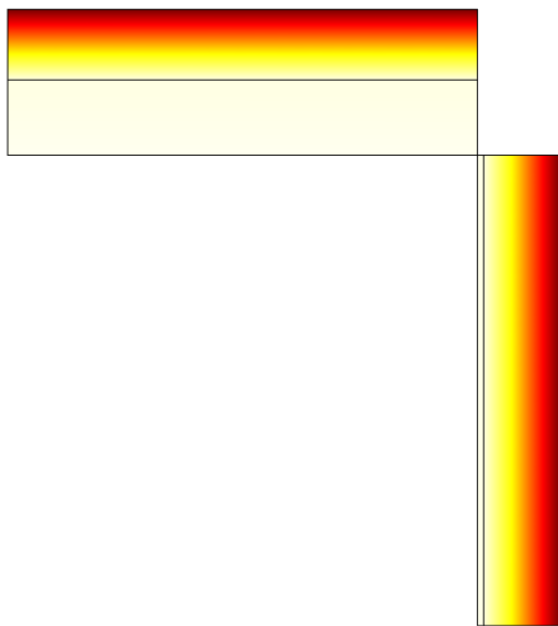
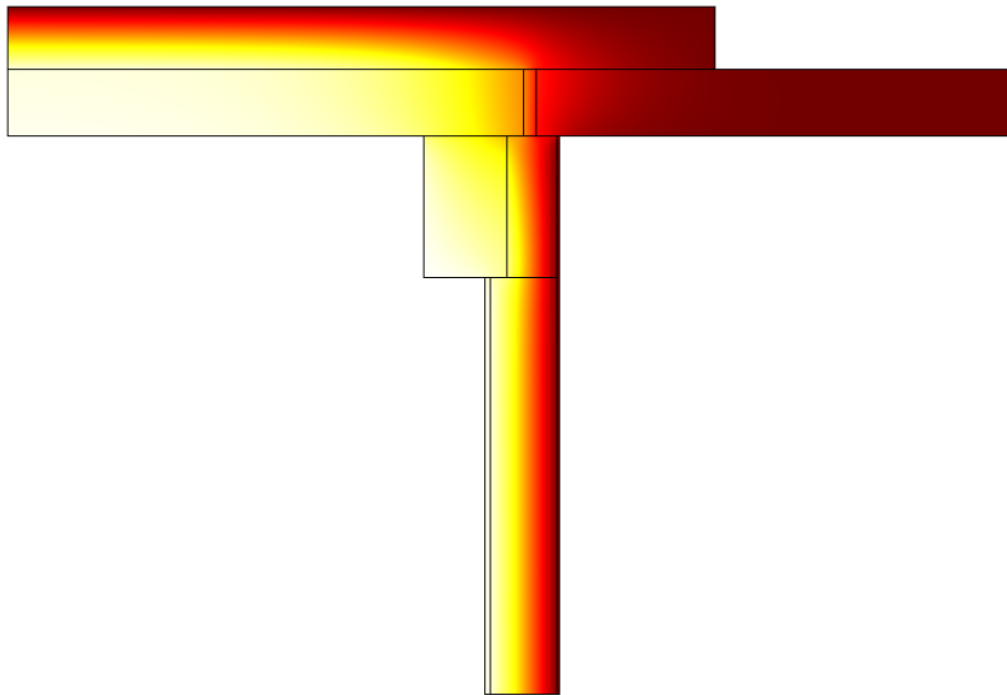
Detalj D: Bjälklagsinfästning



$U_{vägg} = 0,792 \text{ W/m}^2\text{K}$
$Q_{verklighet} = 1,808 \text{ W/mK}$
$Q_{referensfall} = 1,705 \text{ W/mK}$
$\Psi = 0,10 \text{ W/mK}$

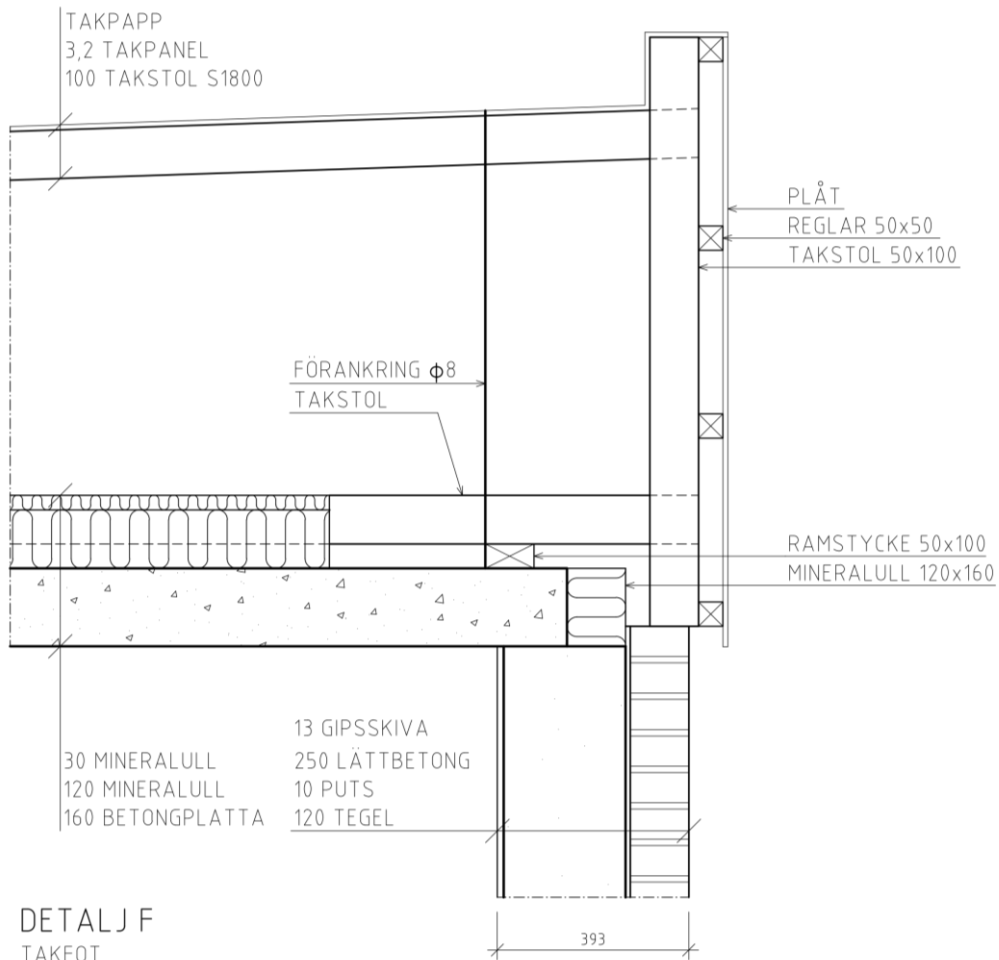
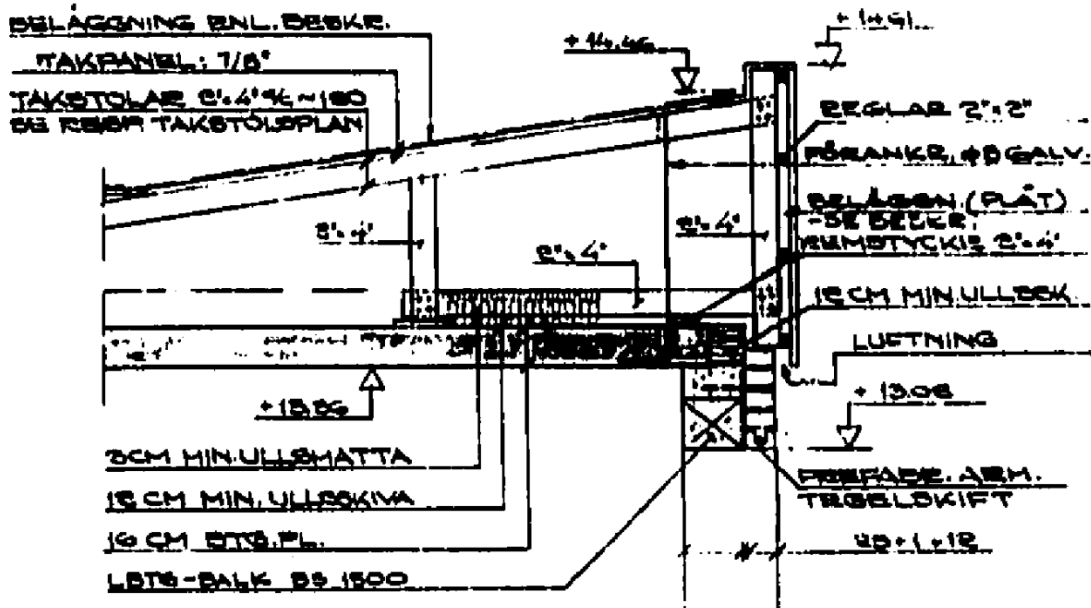
Detalj E: Takfot vid balkong



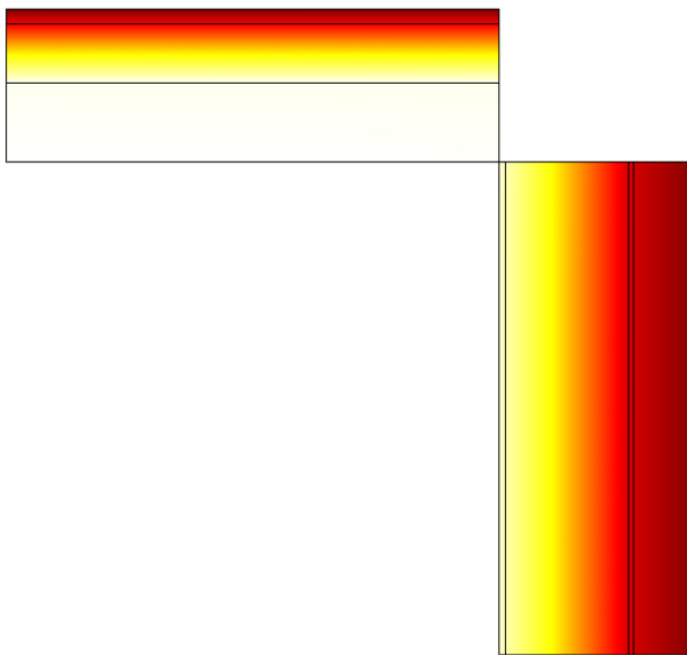
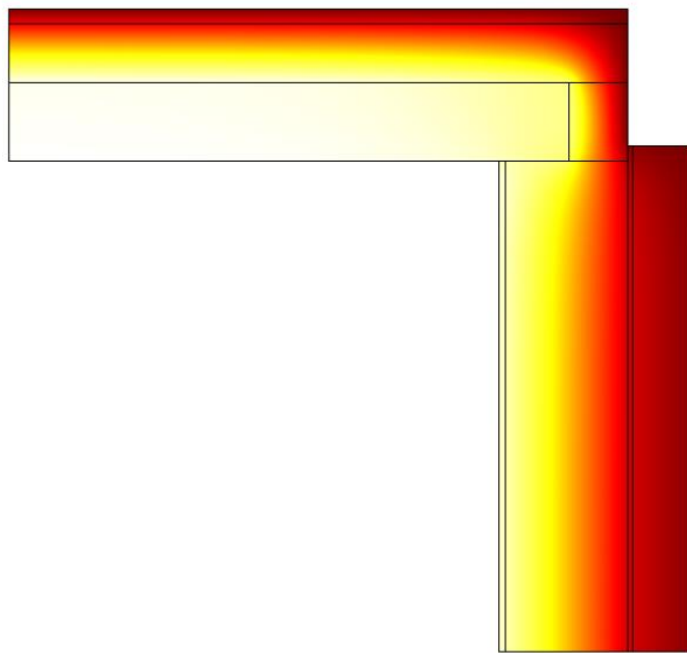


$U_{\text{tak}} = 0,252 \text{ W/m}^2\text{K}$	$q_{\text{verklighet}} = 1,042 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 0,529 \text{ W/mK}$	$\Psi = 0,51 \text{ W/mK}$
--	--	--	----------------------------

Detalj F: Takfot



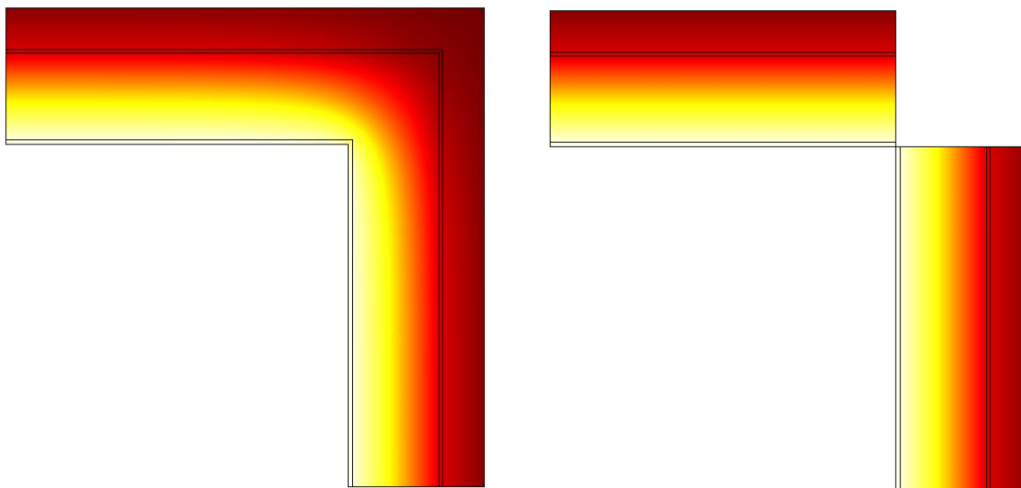
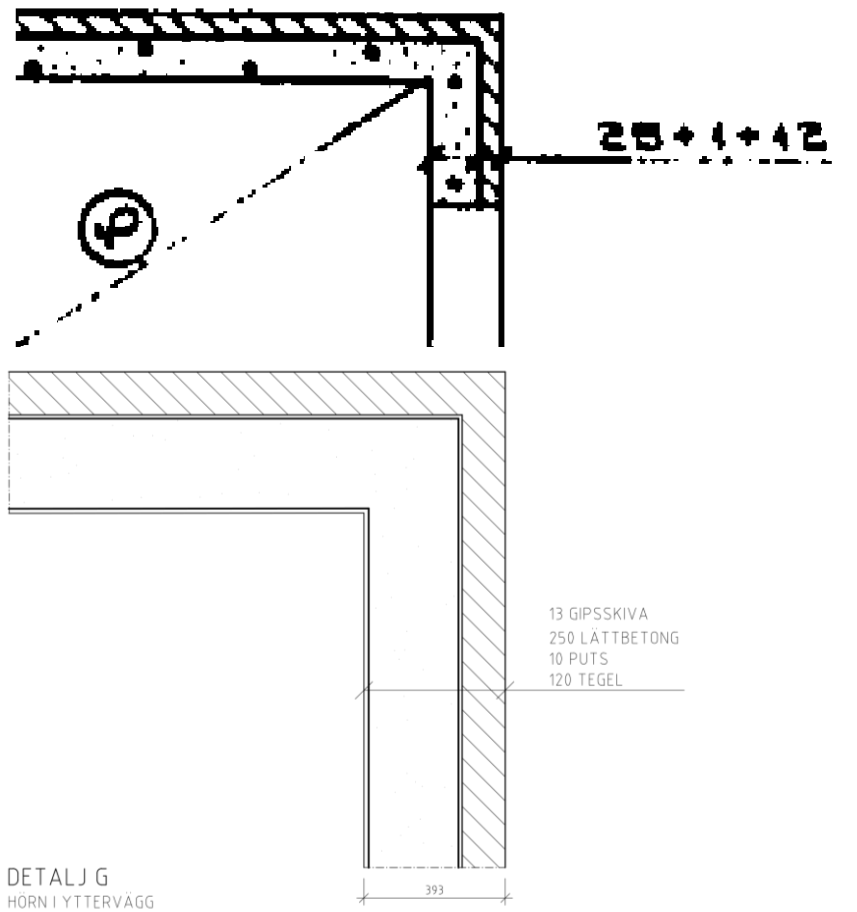
DETALJ F
TAKFOT



$U_{\text{tak}} = 0,252 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_{\text{vägg}} = 0,792 \text{ W/m}^2\text{K}$	
$q_{\text{verklighet}} = 1,169 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 1,042 \text{ W/mK}$	$\Psi = 0,13 \text{ W/mK}$

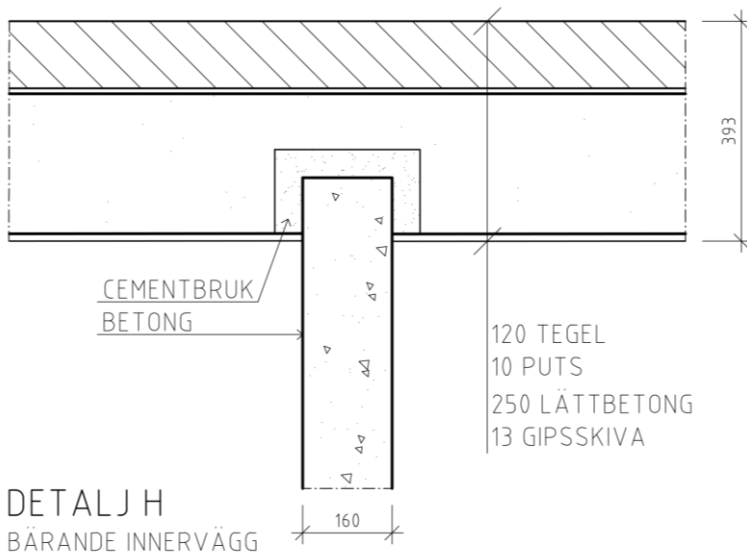
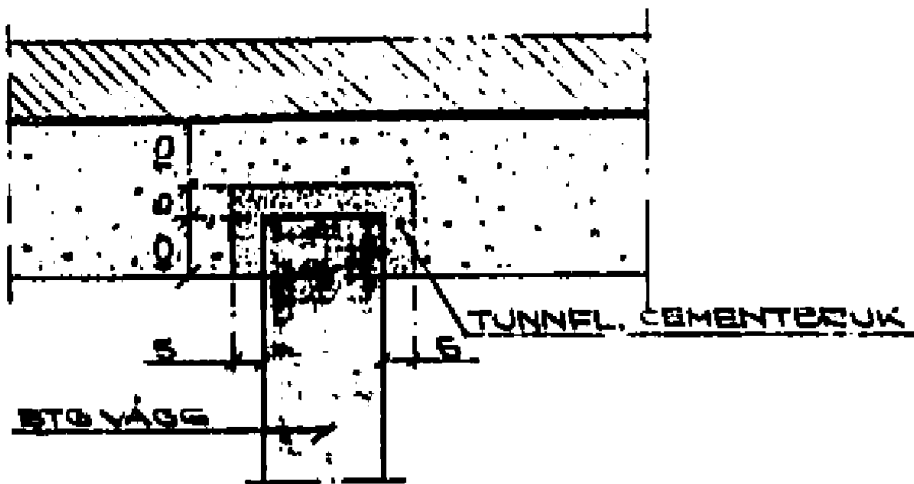
Eftersom yttertaket och takstolarna är oisolerade, tas de inte med i simuleringen då de inte gör någon större skillnad på värmeflödet.

Detalj G: Murat hörn

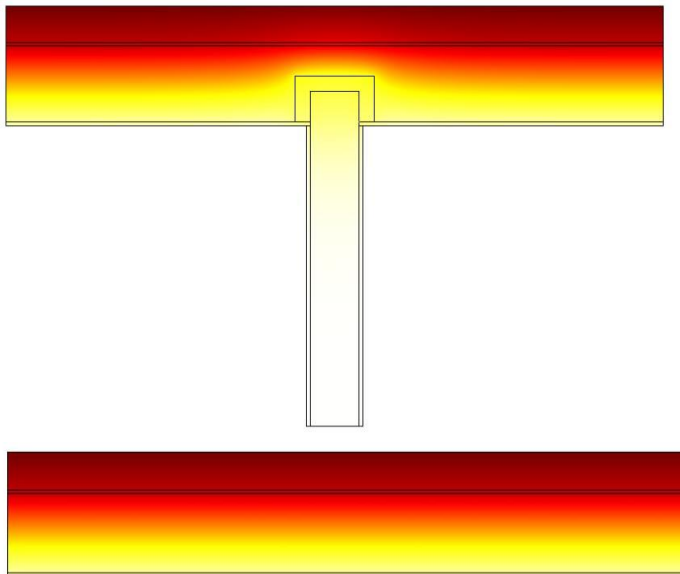


$U_{vägg} = 0,792 \text{ W/m}^2\text{K}$	$q_{\text{verklighet}} = 1,681 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 1,583 \text{ W/mK}$	$\Psi = 0,10 \text{ W/mK}$
--	--	--	----------------------------

Detalj H: Bärande innervägg mot yttervägg



DETALJ H
BÄRANDE INNERVÄGG



$U_{\text{vägg}} = 0,792 \text{ W/m}^2\text{K}$	$q_{\text{verklighet}} = 1,875 \text{ W/mK}$	$q_{\text{referensfall}} = 1,705 \text{ W/mK}$	$\Psi = 0,17 \text{ W/mK}$
---	--	--	----------------------------

Bilaga 2: Beräkning av U-värden och areor

I Bilaga 2 redovisas U-värden och areor för byggnadens klimatskal. De resulterar i den genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten.

U-värde för vägg

Material	λ [W/mK]	$R_{i=\frac{t}{\lambda}}$ [m ² K/W]
		$R_{si} = 0,13$
Gips	0,22	$\frac{0,013}{0,22}$
Lättbetong	0,5	$\frac{0,250}{0,28}$
Puts	1,0	$\frac{0,01}{1,0} = 0,01$
Tegelvägg (viktat)	0,856	$\frac{0,120}{0,856}$
		$R_{se} = 0,04$

13 GIPSSKIVA
250 LÄTTBETONG
10 PUTS
120 TEGEL

393

λ -värdesmetod

$$R_{\text{tot}}^{\lambda} = R_{si} + \sum R_i + R_{se}$$

$$R_{\text{tot}}^{\lambda} = 0,13 + \frac{0,013}{0,22} + \frac{0,250}{0,28} + 0,01 + \frac{0,120}{0,856} + 0,04 = 1,2721 \text{ m}^2\text{K/W}$$

U-värdesmetod

Endast tegel, $\lambda = 0,7 \text{ W/mK}$

$$R_{\text{tegel}}^U = 0,13 + \frac{0,013}{0,22} + \frac{0,250}{0,28} + 0,01 + \frac{0,120}{0,7} + 0,04 = 1,3034 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Endast bruk, $\lambda = 0,16 \text{ W/mK}$

$$R_{\text{bruk}}^U = 0,13 + \frac{0,013}{0,22} + \frac{0,250}{0,28} + 0,01 + \frac{0,120}{1,6} + 0,04 = 1,2070 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}^U} = \frac{0,013}{0,075} \times \frac{1}{1,2070} + \frac{0,062}{0,075} \times \frac{1}{1,3034} = 0,7779 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_{\text{tot}}^U = \frac{1}{0,7779} = 1,2856 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\frac{R_{\text{tot}}^{\lambda} + R_{\text{tot}}^U}{2} = \frac{1,2721 + 1,2856}{2} = 1,2791 \text{ m}^2\text{K/W}$$

U-värde_{vägg}

$$U_{\text{vägg}} = \frac{1}{R} = \frac{1}{1,2791} = 0,7818 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Korrigerigering av U-värdet har satts till noll W/m²K 1, förutom den för punktformiga köldbryggor, ΔU_f .

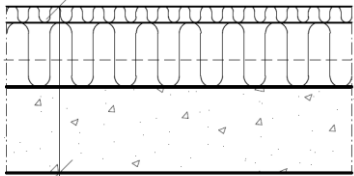
Enligt ritningarna anges antal kramlor/m² och för kramlor multipliceras detta värde med 0,025.

$$\Delta U_f = 0,0025 \times 4 = 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{korrr}} = 0,7818 + 0,01 + 0 + 0 = 0,7918 \text{ W/m}^2\text{K}$$

U-värde för tak

Material	λ [W/mK]	$R_i = \frac{t}{\lambda}$ [m ² K/W]
		$R_{si} = 0,10$
Mineralull	0,04	$\frac{0,150}{0,04}$
Betong	1,9	$\frac{0,160}{1,9}$
		$R_{se} = 0,04$



30 MINERALULL
120 MINERALULL
160 BETONGPLATTA

λ -värdesmetod

$$R_{\text{tot}}^{\lambda} = R_{si} + \sum R_i + R_{se}$$

$$R_{\text{tot}}^{\lambda} = 0,10 + \frac{0,150}{0,04} + \frac{0,160}{1,9} + 0,04 = 3,9742 \text{ m}^2\text{K/W}$$

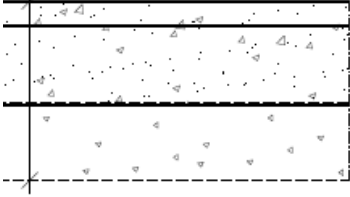
U-värde

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{3,9742} = 0,2516 \text{ W/m}^2\text{K}$$

U-värde för grundplatta

Material	λ W/mK	$R_{i=\frac{t}{\lambda}}$ m ² K/W
		$R_{si} = 0,17$
Dränering	Samma λ som mark, räknas ej med.	
Betong	1,9	$\frac{0,160}{1,9}$
Stålslipning	1,9	$\frac{0,050}{1,9}$
		$R_{se} = 0,01$

50 STÅLSLIPNING
 160 BETONGPLATTA
 PLASTFOLIE VID BELÄGGNING
 150 DRÄNERINGSLAGER



$$R_T = 0,17 + \frac{0,16}{1,9} + \frac{0,050}{1,9} + 0,01 = 0,2905$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,2905} = 3,4423 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Areor på referensobjektets klimatskal

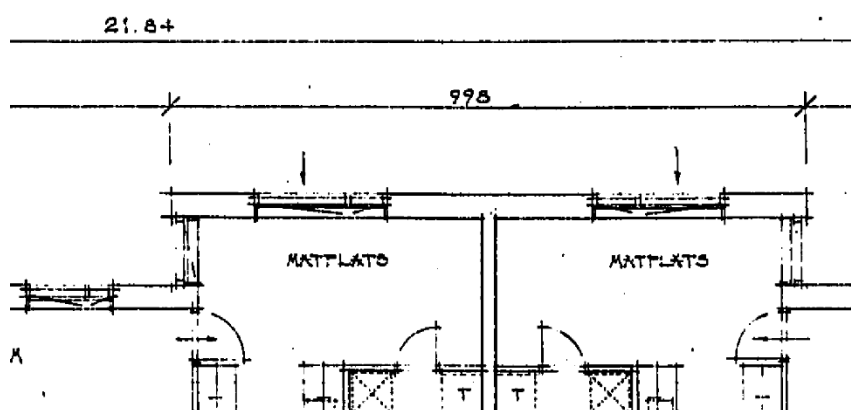
Uppmätning från ritningar

Vissa mått finns angivna på bygghandlingarna, andra har mätts upp och omvandlats till verkligt mått med hjälp av en skalfaktor. Skalfaktorn har räknats ut med ett känt mått som referens enligt:

$$\frac{\text{uppmätt}}{\text{verkligt mått angivet på ritning}} = \text{skalfaktor}$$

Verkligt mått har sedan räknats ut enligt följande:

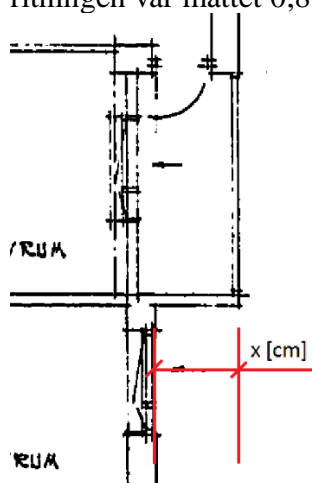
$$\frac{\text{uppmätt}}{\text{skalfaktor}} = \text{verkligt mått}$$



Måttet 998 cm på ritningen ovan har använts för att få fram skalfaktorn. Sträckan mättes till 6,9 cm på ritningen. Insatt i ekvation 1 blir skalfaktorn således:

$$\frac{6,9}{998} = 6,91 \times 10^{-3}$$

Skalfaktorn kontrollerades sedan med ett annat känt mått med hjälp av ekvation 2. Det kontrollerades då om angivet mått på ritningen stämde överens med ”verkligt mått”. Skalfaktorn användes bland annat för att få fram bredden på en balkong (x). På ritningen var måttet 0,8 cm. Detta sätts in i ekvation 2:



$$x = \frac{\text{uppmätt}}{\text{skalfaktor}} = \frac{0,8}{6,91 \times 10^{-3}} = 115 \text{ cm}$$

Areor på ytterväggar

Framöver räknas alla areor i m². Invändiga mått har använts.

Arbetet börjar med att sammanställa alla väggars invändiga mått. Därefter multipliceras de med rumshöjden. Källarens rumshöjd skiljer sig från plan 0-3. I källaren är rumshöjden 2,4 m och på resterande plan är den 2,5 m. Därav räknas källaren för sig.

Summa av väggars area i källaren:

$$221 \text{ m}^2$$

Summa av väggars area på ett plan:

$$231 \text{ m}^2$$

Skillnad mellan källaren och ett vanligt våningsplan blir alltså 10 m², vilket motiverar att separera dem.

Väggarea på plan 0-3:

$$231 * 4 = 922 \text{ m}^2$$

Total väggarea i hela huset:

$$922 + 221 = \mathbf{1140 \text{ m}^2}$$

Detta är inklusive dörrar och fönster. Beräkningar för dörrar och fönsters area redovisas nedan.

Fönster- och dörrarea

Fönster och dörrar är lika på alla våningsplan 0-3 med undantag från entrédörren på plan 0 som på plan 1-3 ersätts med ett fönster. Det finns även en ytterdörr i källaren.

Ett referensplan definieras enligt: Ett våningsplan utan entrédörr eller motsvarande fönster av typ 1. Arealen för fönster och dörrar på ett referensplan räknas ut.

Tre olika fönstertyper och en typ av dörr (balkongdörr) har upptäckts.

$$\text{area för en fönstertyp på referensplanet} = \text{bredd} \times \text{höjd} \times \text{antal}$$

$$\text{Fönstertyp 1: } f_1 = 1,44 \times 1,36 = 1,96 \text{ m}^2$$

$$1,96 \times 9 = 17,6 \text{ m}^2$$

$$\text{Fönstertyp 2: } 2,1 \times 1,36 \times 4 = 11,4 \text{ m}^2$$

$$\text{Fönstertyp 3: } 2,6 \times 1,36 \times 4 = 14,1 \text{ m}^2$$

Dörrar:

Bredd: 0,724 m

Höjd: 2,1 m

Antal: 4 st

$$A_{dref} = 0,724 \times 2,1 \times 4 = 6,08 \text{ m}^2$$

Totalt fönster och dörrar på ett referensplan:

$$A_{ref} = 17,6 + 11,4 + 14,1 + 6,08 = 49,3 \text{ m}^2$$

Våning 1-3

$$A_{fdvån1-3} = (A_{ref} + 1 * f_1) \times 3 = (49,3 + 1 * 1,96) \times 3 = 154 \text{ m}^2$$

Entréplan

$$\text{Area på entrédörr: } a_{de} = 2,25 \times 2,01 = 4,52 \text{ m}^2$$

$$A_{fde} = A_{ref} + 1 \times a_{de} = 49,3 + 4,52 = 53,8 \text{ m}^2$$

Källarplan

$$A_{fdk} = A_d = b \times h = 0,724 \times 2,1 = 1,52$$

Total area för fönster och dörrar

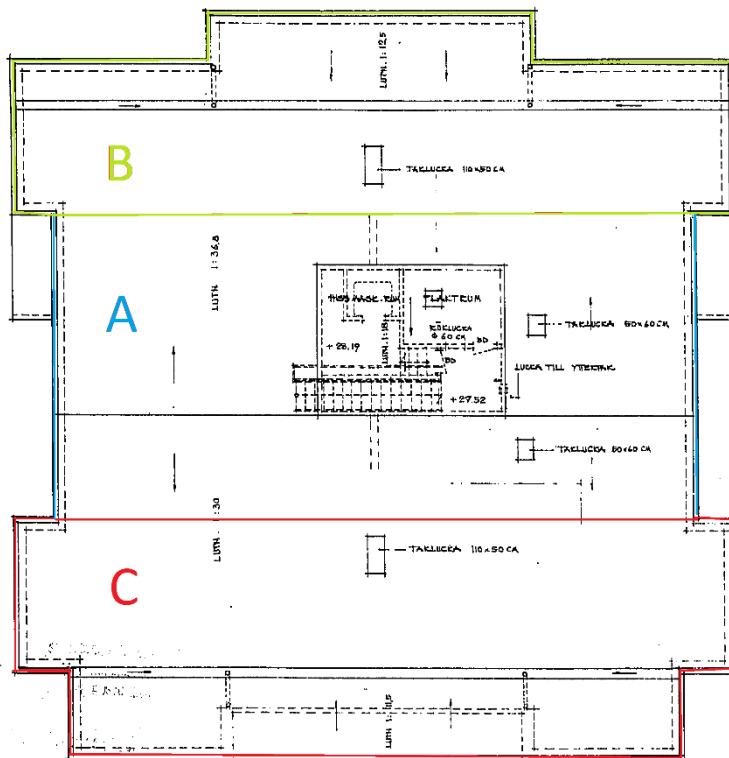
$$A_{fdt} = A_{fdvån1-3} + A_{fde} + A_{fdk} = 154 + 53,5 + 1,52 = \mathbf{207 \text{ m}^2}$$

Väggar utan fönster och dörrar

$$A_{väggar} = \text{total väggarea} - A_{fdt} = 1140 - 207 = \mathbf{937 \text{ m}^2}$$

Takets area

Taket delas in i tre zoner, A, B och C:

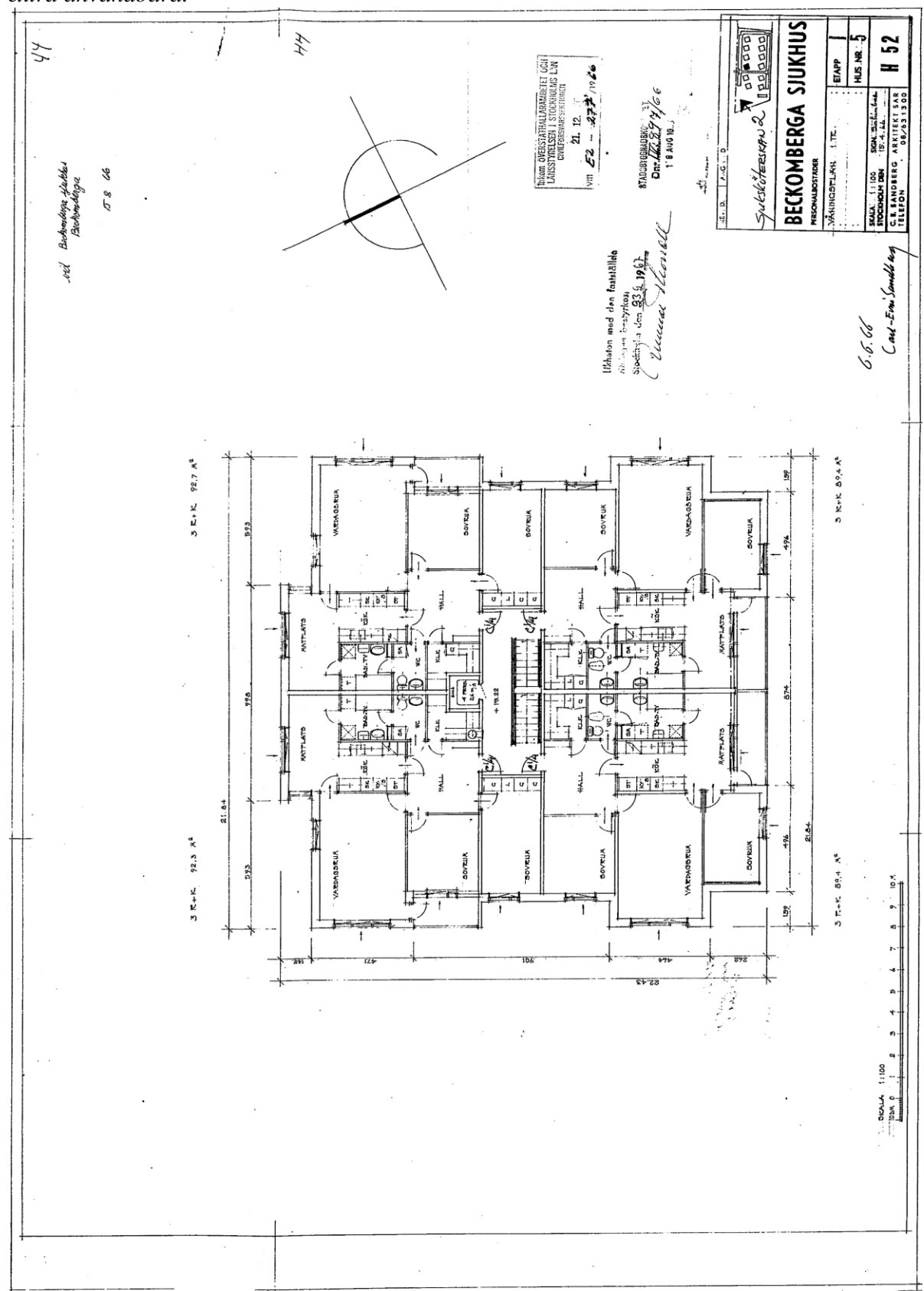


$$\text{Takets area } A_{\text{tak}} = A + B + C = 276 + 93,6 + 115 = 485 \text{ m}^2$$

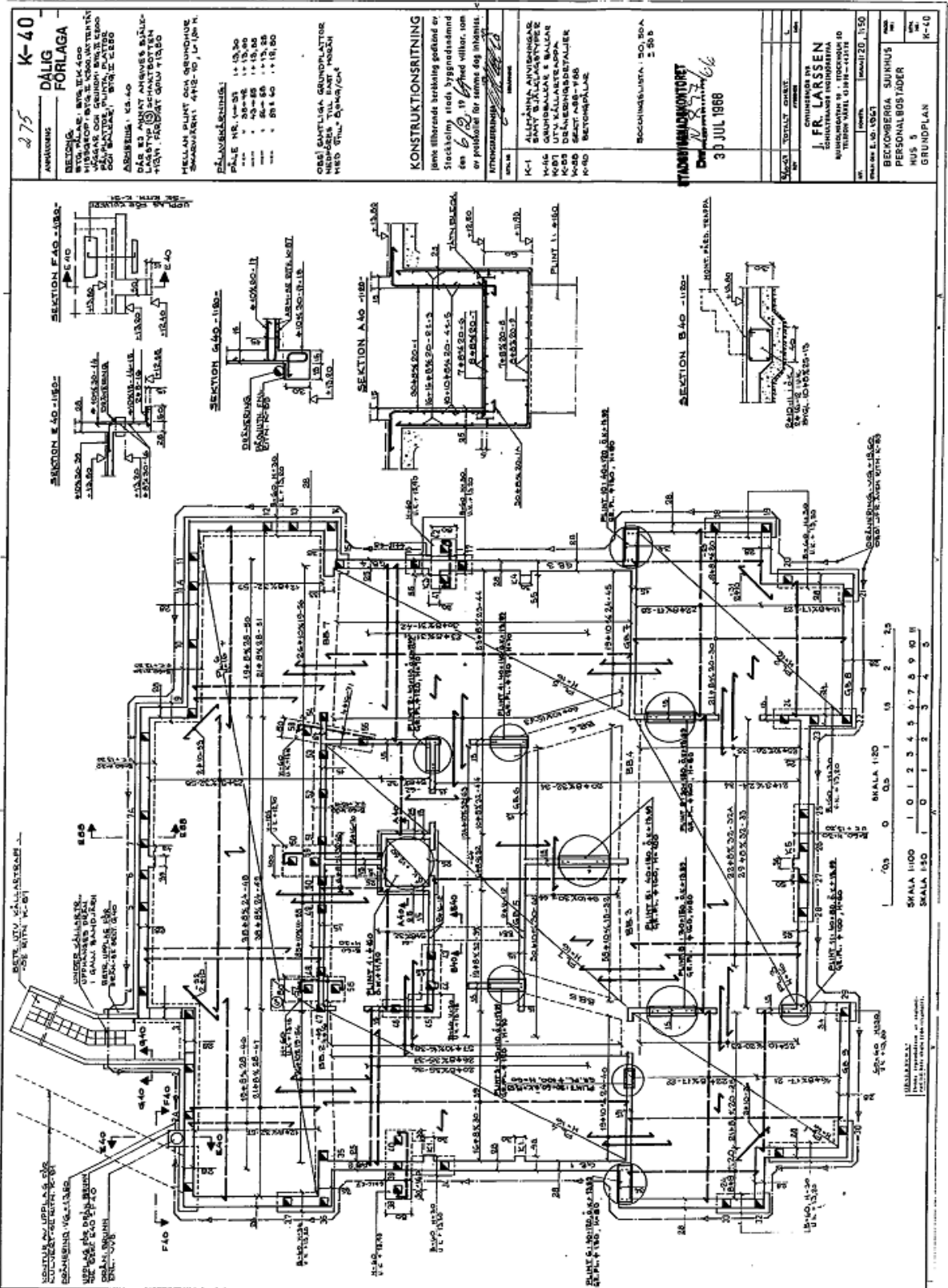
Takets area inkluderar takluckor då det är ett kalltak och takluckorna således inte ingår i klimatskalet. Arealen inkluderar maskinrummet i mitten. Taklutningen antas vara så pass låg (1:12 som mest) att den inte påverkar takets area. Taket har därför antagits vara helt platt.

Bilaga 3: Originalritningar

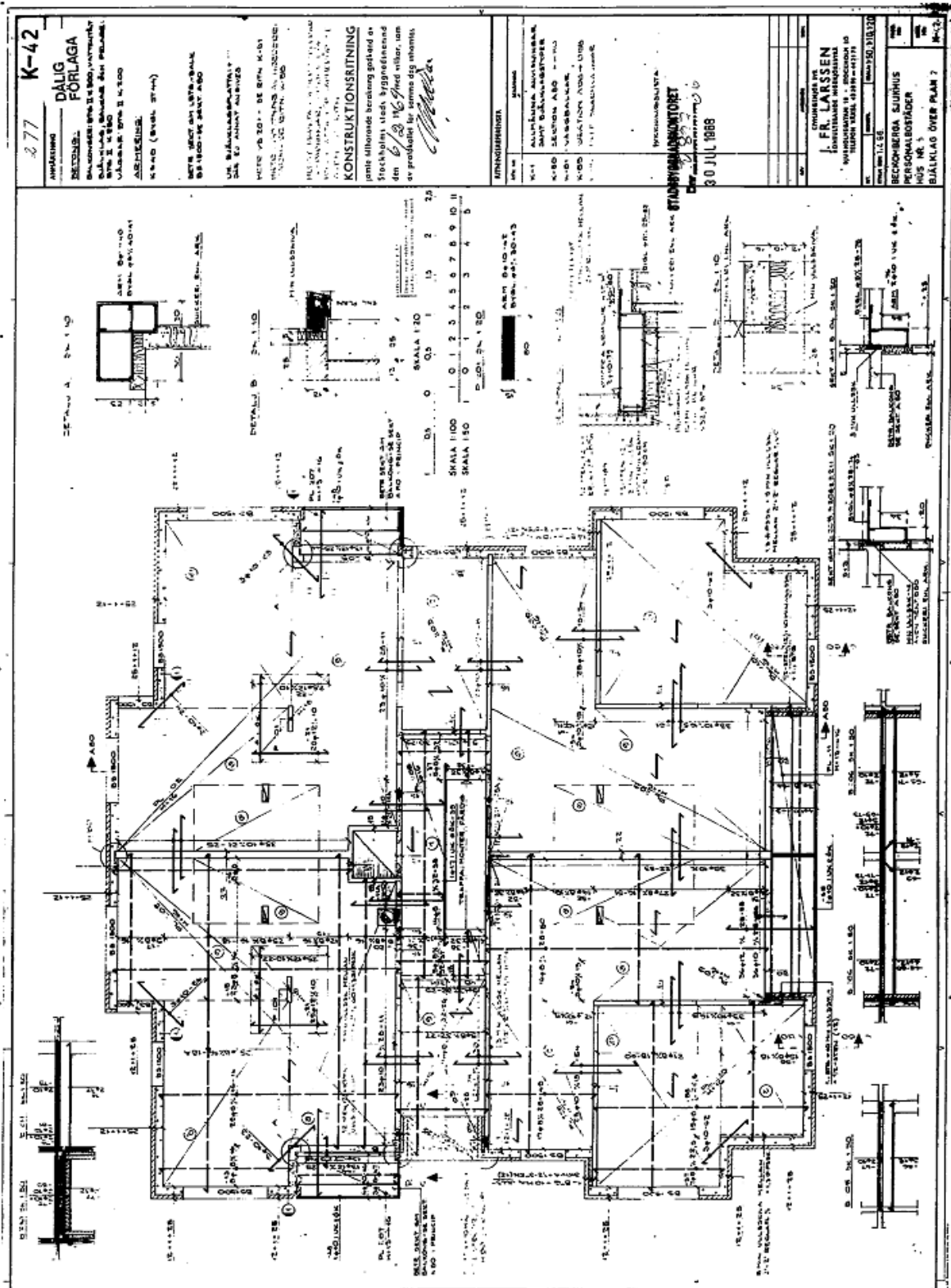
Här presenteras ett urval originalritningarna från Stockholms stads arkiv, som varit extra användbara.



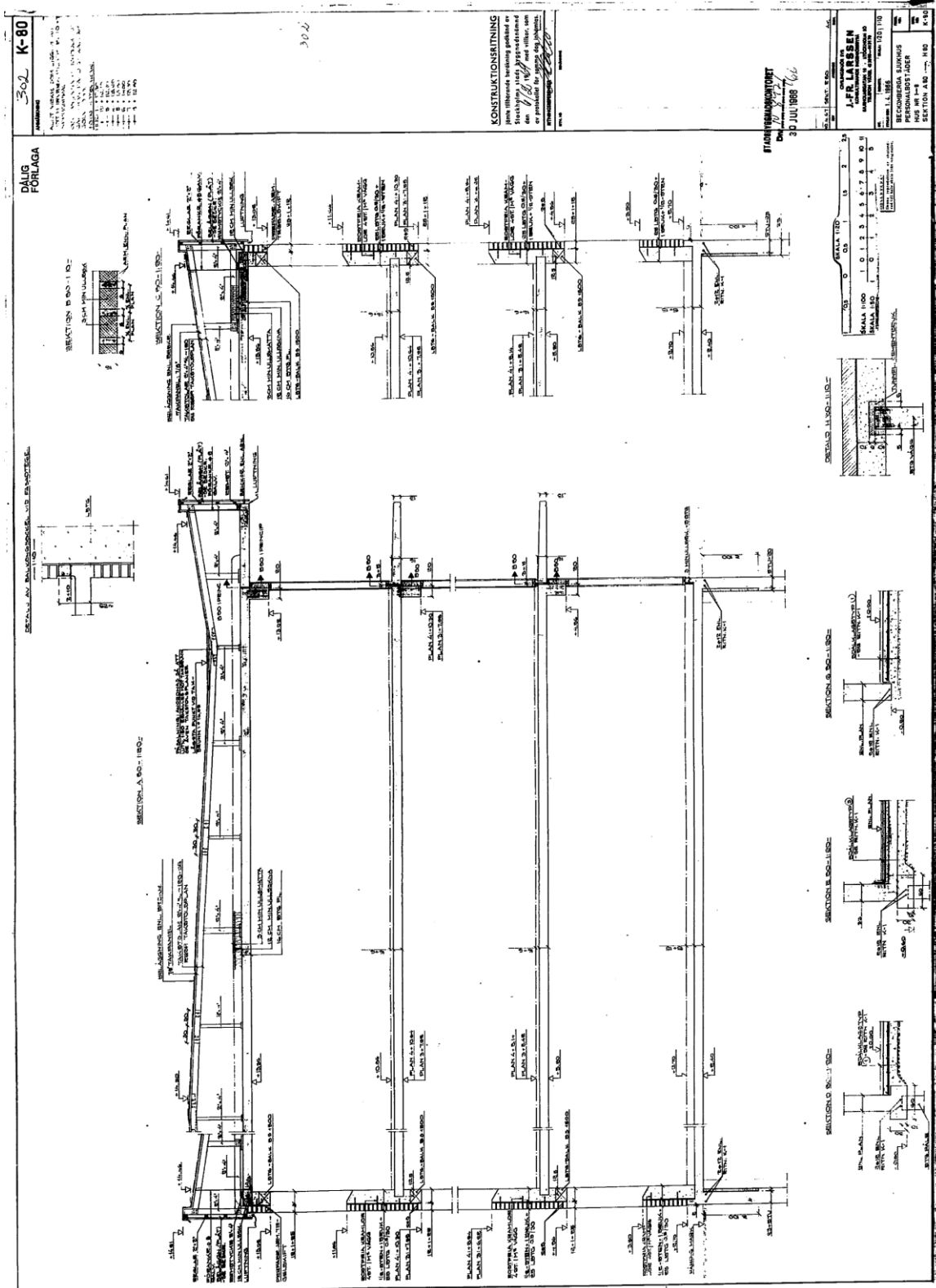
Planlösning våningsplan lan 1 (Arkitekturritning).



Grundplan (Konstruktionsritning).



Bjälklag över plan 2 (Konstruktionsritning).



Sektion A80-H80 (Konstruktionsritning).