

BYGGNADSUTFORMNING OCH VÄRMEKAPACITET

Förstudie och litteraturinventering

av

Professor Tekn Dr Christer Harrysson

mars 2004

FÖRORD

Åtskilliga FoU-projekt har under åren genomförts inom området byggnaders värmekapacitet. Resultaten har dock sällan kommit till praktisk användning. Detta beror bland annat på frågans komplexitet och teoretiska svårighetsgrad tillsammans med beräkningsnoggrannhet samt stora variationer hos inverkan hos faktorer och delposter.

Denna förstudie har tagit fasta på nämnda förhållanden. Med inriktning på praktisk användning och helhetssyn för byggnaden som energisystem har utkast gjorts till en praktisk vägledning för projektörer och marknadsförare. Dessutom skisseras en enkel förklaringsmodell för vidare analys av värmekapacitetens betydelse.

Projektet, som finansierats av SBUF, har initierats tillsammans med Bengt Sandberg och Lars Östberg, båda inom PEAB. Projektledare har varit Lars Östberg, som aktivt medverkat vid genomförandet och bidragit med många konstruktiva synpunkter inte minst på rapporten. Tidigare versioner av manuskriptet har granskats av tekn dr Arne Cajdert, Örebro, som därvid lämnat många förslag på projektets innehåll och manuskriptet.

Ett varmt tack till alla som stöttat projektets tillkomst och genomförande!

Falkenberg i mars 2004

Christer Harrysson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	2
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	3
BETECKNINGAR	5
SAMMANFATTNING	6
1. INLEDNING	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Syfte och uppläggnig	10
1.3 Omfattning och genomförande	10
2. UTKAST TILL VÄGLEDNING	12
2.1 Introduktion	12
2.2 Checklista	13
2.3 Exempel på frågor - svar	15
3. HUSUTFORMNING, INNEMILJÖ OCH ENERGI	16
3.1 Några urvalskriterier	16
3.2 Projekteringsråd	17
3.2.1 Utgångspunkter	17
3.2.2 Energieffektivitet - komfort	17
3.2.3 Värmeförluster - gratisvärme	17
3.2.4 Ventilation - glasytor	18
3.2.5 Golvvärme	18
4. TERMISKT INNEKLIMAT	20
4.1 Inverkande faktorer	20
4.2 Termiska komfortkrav	24
5. VÄRMETRANSPORT	26
5.1 Värmegenomgångskoefficient	26
5.2 Stationära förhållanden	26
5.3 Instationära förhållanden	27
5.4 Värmekapacitet	32
5.4.1 Introduktion	32
5.4.2 Total värmekapacitet	33
5.4.3 Aktiv värmekapacitet vid periodiska temperatursvängningar	33
6. EFFEKT- OCH ENERGIBALANS	38
6.1 Energianvändning och variationer	38
6.2 Energibalansbegreppet	39
6.3 Praktikfall. Äldre respektive nytt småhus	41
6.4 Andras beräkningsresultat	45

7.	BERÄKNINGSMETODER	47
7.1	Introduktion	47
7.2	Stationära eller instationära förhållanden	47
7.3	Överslagsmetoder kontra avancerade datorprogram	48
7.4	Föreslagen beräkningsmetodik	48
8.	SAMMANFATTANDE SLUTSATSER	51
9.	FÖRSLAG TILL FRAMTIDA FoU-SATSNINGAR	52
10.	REFERENSER	55
	BILAGA 1. GENOMGÅNGS- OCH LAGRINGSFAKTORER FÖR NÅGRA KONSTRUKTIONER BERÄKNADE ENLIGT TS-METODEN, Harrysson (1988)	58

BETECKNINGAR

A	amplitud	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
b	värmeinträdningskoefficient	$\text{J}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C s}^{1/2}$
B	amplitud	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
B	betongkonstruktion	-
C	värmekapacitet	Ws/K
c	värmekapacitet per massenhet	$\text{Ws}/\text{kg K}$
clo	clothes	-
d	tjocklek	m
d_{akt}	aktiv tjocklek för ett oändligt tjockt skikt	m
I	lagringsfaktor	$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
J	genomgångsfaktor	$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
k	äldre beteckning för U-värde (ofta ganska lika numeriska värden)	$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
K	genomgångsfaktor	$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
M	mineralullskonstruktion	-
L	lagringsfaktor	$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
L	lättbetongkonstruktion	-
m	byggnadsdelens massa	kg
met	metabolism	-
P'_{F}	transmissionsfaktor fönster	W/K
P'_{tr}	transmissionfaktor	W/K
P_{trj}	transmitterad värmeeffekt för byggnadsdel j	W
P'_{vent}	ventilationsfaktor	W/K
q	värmefflöde	$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
R_i	värmeövergångsmotstånd på insidan	$\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$
$R_1 \dots R_N$	värmemotstånd för respektive skikt 1 - N	$\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$
R_u	värmeövergångsmotstånd på utsidan	$\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$
t	tid	h, s
t_o	periodlängd	s
T	temperatur	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_A	temperatur på yta A	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_{A_o}	ytans A medeltemperatur	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_{B_o}	ytans B medeltemperatur	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_0	materiallets temperatur från början vid tiden $t = 0$	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_1	yttemperaturen ändras till T_1 vid tiden $t = 0$	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_i	innetemperatur	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
U	värmegenomgångskoefficient	$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
U_j	värmegenomgångskoefficient för byggnadsdel j	$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
$W_{A_{\infty}}$	största värmemängd som kan magasineras under en halv period med värmefflödet $q_{A_{\infty}}$ i ett skikt med oändlig tjocklek	$\text{kJ}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Y_j	ytan för byggnadsdel j	m^2
β	$\sqrt{\omega / 2 \cdot \kappa}$	m^{-1}
δ	våglängd	m
φ	fasförskjutning	radianer
κ	värmediffusivitet	m^2/s
λ	värmeledning	$\text{W}/\text{m K}$
ρ	densitet	kg/m^3
ω	vinkelfrekvens	radianer/s

SAMMANFATTNING

Stora skillnader i förutsättningar komplicerar värmekapacitetsfrågan

Värmekapacitetens betydelse för det termiska inneklimatet, effektuttaget och energianvändningen är en mångfasetterad fråga, som kompliceras av ämnets teoretiska svårighetsgrad. Praktiska frågeställningar avser ofta valet av stomkonstruktion med olika värmekapacitet dvs lätt eller tungt byggeri. Ibland är skillnaden liten mellan dessa båda huvudalternativ t ex för årsenergianvändningen i bostäder vid antagande om konstant innetemperatur. Variationer i boendevanor mellan olika hus och beräkningsnoggrannheten kan då t o m medföra avsevärt större skillnader. Svaren på frågan om man skall välja lätt eller tung byggnad beror på många olika faktorer och förutsättningar t ex för innetemperatur och gratisvärme.

Den termiska komforten inne bestäms primärt av människans känslighet för absolutnivå och variationer i luft- och strålningstemperaturer samt lufrörelser. Material och konstruktioner som minimerar temperaturvariationer och lufrörelser är därför att rekommendera. Ju energisnålare huset i sig är desto större relativ betydelse har värmekapaciteten för att man maximalt skall kunna utnyttja gratisvärmets och samtidigt skapa så jämn innetemperatur som möjligt. Hög värmekapacitet minskar dessutom kylbehovet.

Energieffektiva lösningar

Kriterier för energieffektiva lösningar är bland annat

- låga U-värden
- god lufttäthet
- ökat gratisvärmeutnyttjande med höjt värmekapacitetsutnyttjande
- genomtänkt strategi för styrning av kyla, ventilation och värme

Därtill skall läggas valet av (yt-)material och byggnadens utformning t ex glasyornas storlek..

Förstudie med praktisk vägledning

Förstudien innefattar en begränsad litteraturstudie, förhållandevis av nyare litteratur samt förslag till en praktisk vägledning som i olika situationer skall underlätta för projektörer och marknadsförare i valet mellan lätt och tungt byggeri. Vägledningen baseras på en relativt enkel förklaringsmodell för sambanden energi - effekt - innetemperatur - tid. Exempel på rådgivning ges i form av frågor/svar. Därvid kommenteras olika i litteraturen lämnade uppgifter och tillrättaläggs vid behov.

Förstudien omfattar bruksskedet och avser periodlängden dygn, som t ex med hänsyn till klimatvariationer och elnätets belastning är en av de viktigaste perioderna när värmekapaciteten har betydelse. Livscykelfrågor lämnas till en framtida etapp. Värmekapacitetens inverkan konkretiseras och kommenteras för ett antal vanligt förekommande praktikfall t ex periodiska temperatursänkningar nattetid eller dagtid.

Beräkningsmetoder och exempel

En genomgång har gjorts av principiellt olika beräkningsmetoder uppdelat på stora datorprogram och överslagsmetoder. För ökad förståelse av det fysikaliska problemet är

överslagsmetoder lämpligast vid parameterstudier liksom för lösning av delproblem. Metoder som möjliggör analys av beräkningsresultat i mellansteg och har hjälpmedel som diagram ger stora fördelar i form av ökad förståelse etc.

Med den skisserade överslagsmodellen för effektbalansens förlust- och tillskottsposter kan värmekapacitetens inverkan på förloppet relativt enkelt bedömas. Därvid har bl a en uppdelning gjorts i olika delposter: direktverkande t ex genom glasytor respektive tidsfördröjda och dämpade exempelvis genom opaka (ogenomsynliga) ytor. Utifrån dessa samband kan man exempelvis beräkna värmeförlusterna genom transmission eller ventilation liksom behovet av inköpt energi

Utgångspunkt för att studera instationära (tidsvarierande) problem med den föreslagna modellen är den stationära energibalansen t ex för månad, varvid värmekapaciteten försummas. Därtill adderas medelförhållandena för delposterna aritmetiskt vid energibalansbestämningen. Med minskande periodlängd ökar värmekapacitetens inverkan. Efter fourieranalys, i sin enklaste form med en cosinusterm och fasförskjutning för respektive delpost, adderas termerna vektorielt vid effektbalansbestämningen.

Beräkningsexempel redovisas för ett vanligt småhus med konstruktioner från tre epoker (början 1900-talet, SBN67 och dagens) samt med tre olika stomsystem (mineralull, lättbetong och betong). Därmed kan inverkan kvantifieras av olika relationer mellan värmekapacitet, gratisvärme samt förlust- och tillskottsposter t ex transmissions- och ventilationsförluster. Uppgifter har sammanställts och redovisas i bilagor om olika materials och konstruktioners värmelagringsgenskaper. Som framgår kan värmeövergångsmotståndet mellan rumsluften och stommen beroende på ytskikt kraftigt påverka möjligheterna att lagra energi i stommen.

Framtida FoU-satsningar

Förstudien avslutas med sammanfattande slutsatser jämte förslag till framtida satsningar inom området. Mest angeläget är att fullfölja arbetet med

- den föreslagna praktiska vägledningen
- att utveckla och uttesta den skisserade enkla förklaringsmodellen/överslagsmetoden för bedömning av värmekapacitetens inverkan i olika situationer
- att bedöma energianvändning och miljöbelastning under byggnaders hela livslängd, s k livscykelanalys

Olika begrepp för att uppskatta värmekapacitetens storlek och inverkan på effekt- och energianvändning samt inneklimate som total värmekapacitet, storhet enligt Boverkets byggregler och beräkningsprogrammet ENORM baserad på tidskonstanten samt aktiv värmekapacitet måste närmare studeras och resultaten måste redovisas på ett pedagogiskt tilltalande sätt med inriktning på att principiellt förklara olika skillnader.

Det är angeläget att för olika stomkonstruktioner närmare utreda värmekapacitetens inverkan på effektuttag, energianvändning och miljöbelastning under byggnadens hela livslängd. I sammanhanget är det av särskild betydelse att studera gratisvärmets storlek relativt värmeförluster genom transmission och ventilation för byggnader till olika ändamål som bostäder, kontor, skolor etc.

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Byggnader skall utformas för god innemiljö, lågt effekt- och energiuttag till låga årskostnader dvs summan av bygg-, drift- och underhållskostnader. Sedan oljekrisen 1974 har värmeförlusterna från byggnader huvudsakligen minskats genom ökad isolering och förbättrad täthet. Tidigare lades större vikt vid stommens värmekapacitet. Detta gör man fortfarande i länder med stenhustradition. Värmekapacitetens betydelse för inneklimatet, effekt- och energianvändningen diskuteras ofta vid ny- och ombyggnad.

Värmekapacitetsfrågan är komplex. Många olika faktorer inverkar på byggnaders energianvändning. Värmebehovet och den totala energianvändningen för en byggnad varierar i tiden och mellan olika byggnader. Värme lagras i byggnadsstommen, värmesystemet och inredningen. Dessa värmemängder kan ha stor betydelse för effektuttaget under kalla perioder och för möjligheten till minskat effektbehov vid periodvisa temperatursänkningar. Åtskilliga undersökningar har genomförts utan att man i praktiken blivit så mycket kunnigare om värmekapacitetens betydelse bland annat beroende på nämnda faktorer samt på grund av att frågan är svår från teoretisk/matematisk synpunkt.

Av olika energisparåtgärder är inverkan av varierande innetemperatur bland de minst studerade, såväl i experimentella som teoretiska undersökningar. Instationära värmeströmningsförlopp betyder nämligen komplicerade och omfattande beräkningar. Husets stomkonstruktion, inredning, värme- och reglersystem samt brukarvanor är faktorer som har stor betydelse för hur mycket energi som kan sparas.

Behovet av ökade kunskaper om effekt- och energibesparingar vid periodvisa temperatursänkningar har accentuerats genom:

- nya el- och fjärrvärmesystem
- ökad andel elvärme
- ökad användning av värmepumpar
- utveckling av system för temperaturreglering
- ökat intresse för luft- och golvvärmsystem

Export av trähus ofta till länder med djupt rotad stenhustradition tillsammans med den pågående debatten om lätt eller tungt byggeri ställer krav på ökade kunskaper om värmekapacitetens betydelse för effekt- och energibehovet i nyproducerade småhus. I debatten om värmelagringens betydelse har man hittills baserat sina uttalanden på att en alltför stor del av stommen medverkar i förloppet. Även Boverkets modifierade metod för bestämning av dimensionerande värmeeffektbehov överskattar värmekapacitetens betydelse, Gustén & Harrysson (1980) och Harrysson (1984).

Tunga konstruktioner har större förutsättningar att lagra värme än lätta. Det finns emellertid även möjligheter att förbättra/öka värmekapaciteten hos befintliga traditionella trähus, Harrysson (1981). Valet av ytskikt och beklädnadsmaterial kan starkt påverka värmelagringsmöjligheterna i såväl lätta som tunga hus. En förutsättning för att man skall kunna utnyttja värmelagring är att materialens och inneluftens temperatur tillåts variera. Om innetemperaturen inte får ändras är byggnadens värmekapacitet ofta utan betydelse. Beräkningar av bland andra Adamson & Gaffner (1981) visar att värmekapaciteten i bostäder med konstant innetemperatur i stort sett saknar betydelse för årsenergianvändningen.

Värmekapaciteten har dock betydelse för det maximala effektuttaget. För kortperiodiska temperaturvariationer, t ex under dygn, inverkar värmekapaciteten på såväl effekt- som energiuttaget.

I projekterings- och energisammanhang debatteras många gånger värmekapacitetens inverkan med mer eller mindre korrekta slutsatser. Exempel på dylika påståenden och felaktig behandling av värmekapacitetens betydelse är:

- Stommens totala värmekapacitet har använts för beräkning av energibesparing vid nattsänkning
- Man sparar inte energi genom att sänka temperaturen under vissa perioder
- Årsenergibehovet är ganska lika för lätt eller tung stomme och skiljer endast några kilowattimmar

Uttalandena ovan visar på bristfälliga kunskaper om värmekapacitetens betydelse. Exempelvis är det endast delar av stommen som medverkar vid periodvisa sänkningar av innetemperaturen. Varje sänkning leder dock till energibesparing. I det sistnämnda fallet måste förutsättningarna specificeras t ex för byggnadens ändamål och verksamhet t ex beträffande temperaturkrav, ventilation, gratisvärme och byggnadens värmekniska prestanda.

Sedan oljekrisen 1974 har värmehushållningskraven successivt skärpts, vilket medfört minskat behov av inköpt energi samt ändrade förhållanden mellan olika förlust- och tillskottsposter i effekt- och energibalansen. Ju energisnålare huset i sig är utformat desto större andel utgör gratisvärmets av det totala behovet för byggnadsuppvärmning. Gratisvärmets utgör därmed en relativt större del av den totala energianvändningen med ökade svårigheter att ta tillvara detta för byggnadsuppvärmning utan besvärande övertemperaturer.

Frekvensen klagomål p g a övertemperaturer inne i nya byggnader har kraftigt ökat. Större och rumshöga glasytor har accentuerat övertemperaturproblemen. De allt större svårigheterna med att undvika övertemperaturer i nya byggnader har ökat intresset för att skapa ett jämnare inneklimat och effektivare energianvändning t ex med hjälp av kylanläggningar och byggnadstekniska åtgärder som olika solavskärmningar och värmelagring i byggnadsstommen.

Med de skärpta värmehushållningskraven har vidare relationerna mellan byggnadens värmekapacitet, gratisvärme, transmissions- och ventilationsförluster kraftigt förändrats. Ökad andel elvärme och värmepumpar har lett till mer effektkänsliga värmesystem än tidigare. Hårt belastade elnät vintertid har ytterligare accentuerat behovet av noggrannare metoder för dimensionerande effekt, varvid bl a värmekapaciteten inverkar.

Sammanfattningsvis är således behovet stort av en praktisk modell för att beskriva värmekapacitetens inverkan på inneklimatet, effekt- och energianvändningen samt för att underlätta förståelsen av det fysikaliska förloppet. De kraftigt ändrade relationerna mellan olika förlust- och tillskottsposter i energibalansen liksom användningen av nya konstruktioner och ökad andel golvvärme accentuerar detta behov. Därmed ökar möjligheterna för att kunna uppnå ett jämnare termiskt inneklimat och effektivare energianvändning.

1.2 Syfte och upplägning

Avsikten med denna förstudie är att höja kunskapsnivån kring värmekapacitetsfrågor genom att:

- Ge förslag till en praktisk vägledning för att i projekterings- och marknadssammanhang konkret belysa värmekapacitetens betydelse. Vägledningen skall ta upp ett antal relevanta frågor/svar.
- Presentera utkast till en förklaringsmodell som beskriver värmekapacitetens inverkan på det termiska inneklimatet samt på effekt- och energianvändningen. Modellen skall vara praktiskt inriktad och underlätta förståelsen av det fysikaliska förloppet samt introduktion av begrepp som kan underlätta förståelsen.
- Kortfattat redogöra för ett antal praktiskt inriktade undersökningar inom området.
- Sammanställa och analysera resultaten i ett antal genomförda beräkningsexempel från nämnda undersökningar.
- Ge exempel på hur värmekapaciteten kan användas för att åstadkomma ett jämnare inneklimat och effektivare energianvändning.
- Ge impulser till produktutveckling av stomsystem.
- Ge förslag till fortsatta FoU-satsningar.

För att belysa värmekapacitetens inverkan på effekt- och energiuttaget vid periodvisa temperatursänkningar respektive vid "rena" avsvalnings- och uppvärmningsförlopp används teorier för instationär värmeströmning. Detta leder vanligtvis till omfattande beräkningsarbeten och därmed datorbaserade metoder. Olika faktorerers inverkan på förloppet och beräkningsnoggrannheten blir svåra att bedöma på grund av bristande överblick på problemet. Detta projekt syftar därför i första hand till att utnyttja överslagsmetoder för "manuella" beräkningar. Beräkningsresultat jämförs med värden som uppmätts vid fältstudier.

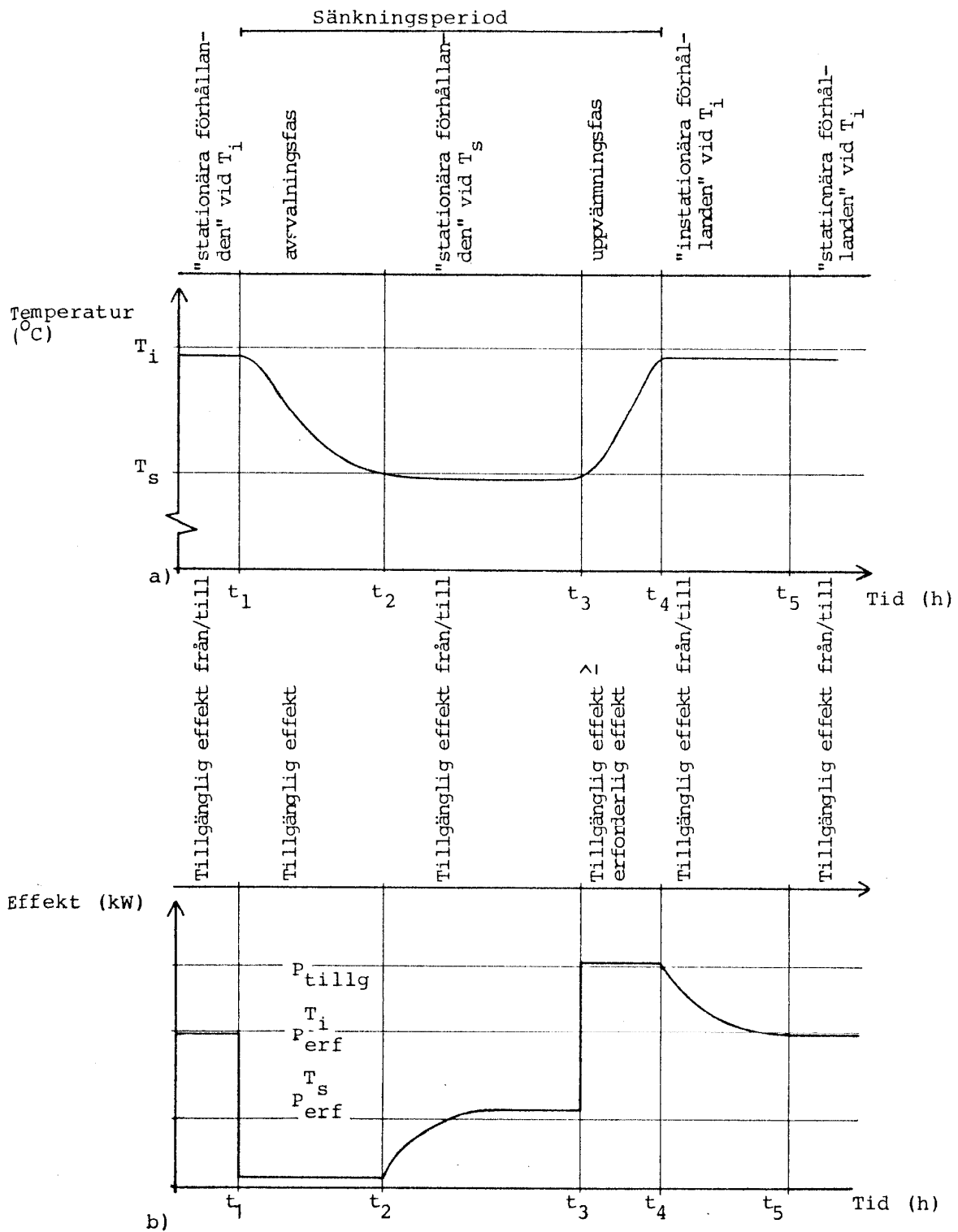
1.3 Omfattning och genomförande

Förstudien innehåller primärt förslag till en praktisk vägledning och förklaringsmodell (överslagsmetod) för att bedöma värmekapacitetens inverkan vid olika förutsättningar under bruksskedet. Vägledningen exemplifieras med ett par vanliga frågor: energibesparing vid nattsänkning respektive i kombination med värmepumpar. Förstudien avgränsas till att omfatta bruksskedet.

Projektet baseras på en begränsad inventering företrädesvis av nyare litteratur. Projekteringsråd ges för utformning av byggnader. En genomgång görs av faktorer som inverkar på det termiska inneklimatet. Särskild vikt läggs vid vilka variationer som är acceptabla för olika faktorer.

Utifrån grunderna för värmetransport vid stationära förhållanden belyses värmekapacitetens inverkan vid instationära förhållanden. Olika begrepp behandlas som total respektive aktiv värmekapacitet. Idéer ges till hur vedertagna begrepp vid stationära förhållanden kan modifieras till att omfatta instationära förhållanden t ex U-värde och dynamiskt U-värde.

Olika delposter i effekt- och energibalansen behandlas särskilt med hänsyn till värmekapaciteten inverkan. Principiellt olika beräkningsmetoder beskrivs som överslagsmetoder och stora datorprogram (omfattande beräkningsprogram). Slutligen ges sammanfattande slutsatser med förslag till framtida FoU-satsningar. Därvid understryks vikten av att dessa får en praktisk inriktning och omfattar byggnaders hela livslängd.



Figur 2.1 Principiella samband mellan temperatur, effekt och tid vid periodvisa temperatursänkningar, Harrysson (1981, 1985). Konstant utetemperatur har därvid förutsatts. Byggnaden antas ha direktverkande termostatreglerade elradiatorer. Sänkningen är tänkt vara reglerad med ett tidur och kontaktorstyrd rumstermostat.

a. Temperatur - tid.
b. Effekt - tid.

2. UTKAST TILL VÄGLEDNING

2.1 Introduktion

I detta kapitel presenteras utkast till en vägledning för val av lätt eller tungt byggeri samt en checklista som underlag för värderingen. Utkastet skall ses som diskussions- och beslutsunderlag för fortsatta FoU-satsningar. Vägledningen är avsedd för projektörer och marknadsförare. Avsikten med vägledningen är att på ett praktiskt och pedagogiskt tilltalande sätt konkretisera värmekapacitetens inverkan på innetemperatur, effektuttag och energianvändning. I denna rapport exemplifieras vägledningen med ett par relevanta frågor/svar.

När är lätt eller tungt byggeri att föredra med hänsyn till effekt, energi och termisk komfort?

Variationerna hos tillskotts- och förlustposterna i byggnaders effekt- och energibalans har vanligtvis endast beaktats genom skillnaderna mellan medelvärdena under vissa tidsperioder, månader. Effekt- och energiuttaget påverkas av värmekapaciteten hos byggnadsstommen, värmesystemet, inredningen och inomhusluften. Dessutom har reglerutrustningens utformning, funktion och användning stor betydelse. Temporärt stora effektuttag kan vålla problem för elverken. Installation av effekttregulatorer kan minska dessa problem och ge husägarna möjlighet att skaffa sig en lägre abonnemangskostnad.

Samspelet klimat-byggnad-värmesystem-reglerutrustning-brukare avgör möjligheterna att spara energi. Detta samspel är särskilt betydelsefullt för avsvalnings- och uppvärmningsfasernas längd. Valet av material, konstruktioner och installationer blir allt mer betydelsefullt om de förväntade besparingarna skall kunna uppnås i praktiken och för att man inte skall få för stora avvikelser mellan beräknat och verkligt effektuttag.

Utgångspunkt för att behandla olika frågor/svar är det i figur 2.1 principiellt redovisade fysikaliska förloppet. Bedömning av värmekapacitetens inverkan avser oftast samvariationen mellan temperatur, effekt, energi(-besparing) och tid. För att kvantitativt bestämma olika egenskapers och faktors inverkan behövs en sammanställning av olika formeluttryck, kapitel 5. Speciellt behövs kvantitativa uppgifter om värmekapaciteten hos olika byggnadsdelar, inneluften, möbler/inredning, innerväggar, klimatskärm etc. Mineralulls-, lättbetong- och betongkonstruktioners värmekapacitetsgenskaper har systematiskt studerats och sammanställts av bl a Harrysson (1981, 1988). En del av dessa uppgifter återges i kapitel 6 och bilaga 1.

Hur innetemperaturen varierar med effekttillförseln eller omvänt jämte inverkan på energibesparing och termisk komfort inne.

Vid denna typ av problem är det nödvändigt att betrakta effekt-tidsdiagrammet under en tillräckligt lång period eftersom den värmemängd som uttas från värmelagret måste återföras under uppvärmningsfasen för att på nytt uppnå stationära förhållanden. Om stommens totala värmekapacitet skall kunna utnyttjas krävs en lång period vid sänkning eller höjning av temperaturen. Ju större temperaturvariation som kan accepteras och ju större värmebehovet är, desto snabbare och effektivare kan stommens värmeinhåll utnyttjas.

De temperaturvariationer som normalt förekommer under ett dygn på grund av varierande klimatförhållanden (temperatur, vind och sol) eller genom periodvisa temperatursänkningar såväl dag- som nattetid är av sådan varaktighet och storlek att endast en del av stommens totala värmekapacitet kan utnyttjas. Ju större värmekapacitet som kan utnyttjas desto längre tid tar det innan stationära förhållanden åter uppnås efter avsvältnings- respektive uppvärmningsfasen, t ex vid nattsänkning eller tillfälligt avbrott i energitillförseln till värmesystemet. Detta kan vara fördelaktigt eftersom gratisvärmets då hinner bidra till att reducera behovet av tillförd energi via värmesystemet. Nackdelen med en hög värmekapacitet är bland annat att det tar längre tid att nå den högre temperaturnivån och stationära förhållanden.

Av särskild betydelse för energibesparingens storlek vid periodvisa temperatursänkningar är hur snabbt och hur låg temperatur som kan uppnås samt hur snabbt den högre temperaturnivån på nytt kan uppnås. Värmekapaciteten möjliggör en förskjutning av värmeuttaget i tiden, vilket kan reducera effektuttaget från värmesystemet beroende på värmekapacitetsegenskaperna dvs om man valt lätt eller tungt byggeri. Andra viktiga förutsättningar avser gratisvärmets storlek, stomkonstruktion, transmissions- och ventilationsförluster, direkta förluster t ex genom glas och ventilation respektive tidsfördröjda förluster genom opaka (ej genomsynliga) byggnadsdelar. Dessutom inverkar vilka inneklimatkrav som ställs.

Effekt- och energibalanser upprättas för klimatskärmens insida med hänsyn till värmelagring och värmegenomgång. Ju energisnålare huset i sig är desto viktigare blir värmekapaciteten för att uppnå ett så jämnt inneklimat och små innetemperaturvariationer som möjligt. Det blir även desto viktigare att värmesystemet kan reglera värmeförseln snabbt.

Värmesystemets värmekapacitetsegenskaper t ex golvvärme kontra radiatorer inverkar. Olika värmesystem medför i sig olika temperaturgradienter och termisk komfort inne. Även valet av ventilationssystem inverkar t ex frånlufts- kontra frånlufts-/tilluftssystem. Med den senare ventilationstypen höjs tilluftstemperaturen.

2.2 Checklista

Förhållandena och valet av lätt eller tungt byggeri påverkas bland annat av förutsättningar beträffande:

BYGGNADENS TERMISKA EGENSKAPER OCH VERKSAMHET

Byggnadens användning/verksamhet

Gratisvärmets storlek i relation till förluster respektive övriga tillskottsposter

Komfortkrav. Förstudien avgränsas till att omfatta beskrivning av olika termiska faktorer och deras variationer

Termiska egenskaper hos klimatskärmen, inre byggnadsdelar, inredning och möbler samt typ av ventilation. Värmeströmmar som är direktverkande t ex genom glasytor och ventilation respektive har viss tidsförskjutning t ex genom opaka (ej genomsynliga) byggnadsdelar.

INNETEMPERATUR

konstant

variabel

periodisk sänkning och/eller höjning

begränsning uppåt resp nedåt
 avsvlnings-/uppvärmningsförlopp
 temperaturvariationens (sänkning, höjning), periodicitet, längd och storlek

EFFEKTILLFÖRSEL

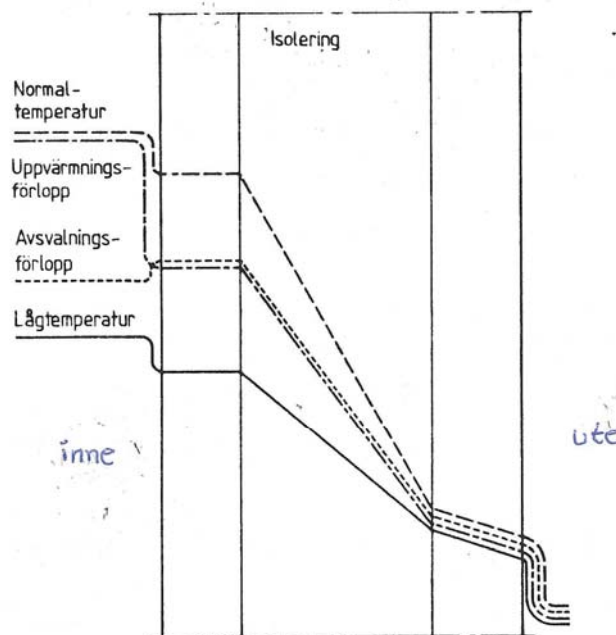
konstant

variabel

begränsning uppåt t ex av värmepump eller totalt effektbortfall (rent avsvlningsförlopp)

Det fysikaliska förloppet vid periodvisa temperatursänkningar åskådliggörs i figurerna 2.1 och 2.2. De skisserade sambanden mellan effekt, energi, temperatur och tid har beräknats enligt teorin för endimensionell instationär värmeströmning, Harrysson (1981).

Sammanfattningsvis behöver man för att närmare kunna bedöma/studera olika frågor kring lätt eller tungt byggeri uppgifter om värmekapaciteten (överslagsmässiga uppgifter) för inneluften, inre byggnadsdelar, inredning och möbler samt för värmeförluster genom transmission och ventilation. Dessutom erfordras uppgifter om respektive tillskotts- och förlustandelar samt om dessa är direktverkande eller dämpade och tidsfördröjda.



Figur 2.2 Exempel på temperaturkurvor i yttervägg vid periodvisa temperatursänkningar, Harrysson (1985).

2.3 Exempel på frågor - svar

Vägledningen exemplifieras här med tre ofta förekommande frågor och svar jämte kommentarer och tillrättalägganden av felaktiga uppgifter i litteraturen.

Energibesparing genom periodiska temperatursänkningar

- Uttalanden kan bero på kunskap, vilka intressen man företräder osv:
Citat "Det lönar sig inte att sänka innetemperaturen. Den energi som sparas vid sänkningen (nattsänkning) går förlorad när man höjer temperaturen och skall återgå till ursprunglig nivå".
- Besparingsuppgifter anges utan hänsyn till husets värmekapacitet för att framhäva nyttan av olika reglersystem.
- Behöver el tillföras via elpatron t ex i kombination med frånluftsvärmepump kan det vara mindre lönsamt med periodiska temperatursänkningar, eftersom tillsatselen då är ca tre gånger dyrare än "värmepumpselen".

De temperatursänkningar som i praktiken är möjliga bestäms i första hand av vilka nivåer och variationer på temperaturer samt luftrörelser som människor kan acceptera. Därtill skall, som framgår av figur 2.1, läggas byggnadens uppvärmningsbehov, värmekapacitet, klimatvariationer ute och inne samt gratisvärmets storlek. Stora innetemperatursänkningar ökar risken för fukt, mögel och dålig lukt som kan begränsa temperatursänkningens storlek. Med hänsyn till nämnda risker är kanske + 15 °C grader en praktisk lägsta sänkingsnivå.

3. HUSUTFORMNING, INNEMILJÖ OCH ENERGI

3.1 Några urvalskriterier

Husutformning, tekniska lösningar och energisparåtgärder väljs bland annat med hänsyn till:

- innemiljöegenskaper
- energianvändning
- effektuttag
- årskostnader (summan av bygg-, drift- och underhållskostnader)

Bland annat måste följande förutsättningar vara uppfyllda, för man skall kunna uppnå ett energieffektivt hus med god innemiljö:

- Torrt och rent byggande, gärna under kontrollerade klimatförhållanden
- Noggrant arbetsutförande för isolering och tätningar m m
- Injustering av värme- och ventilationssystem
- Rena och så korta tilluftskanaler som möjligt

Kvaliteten på arbetsutförandet beror bl a på konstruktionsutformning, produktionsförhållanden och kvalitetssäkringssystem. Ett välbyggt hus ger utöver energibesparing också högre komfort inne, vilket i sin tur kan leda till ytterligare besparingar genom sänkt innetemperatur.

I första hand måste valet av lösning ske från hälsosynpunkt utifrån människans behov och upplevelse av innemiljön. I detta projekt avgränsas innemiljöfrågorna till det termiska inneklimatet. Ofta väljs lösningar som medför låga byggkostnader utan vederbörlig hänsyn till drift- och underhållskostnader. Erfarenheter visar att det ofta är enkla, beprövade och lättskötta lösningar som i realiteten ger bäst innemiljö, har störst energisparpotential och som med högst tillförlitlighet ger utlovad energibesparing.

Klimatskärmar med allt bättre isolering och större fönsterytor ökar komfortskillnaderna och leder till hus för vilka gratisvärmets relativt sett utgör en allt större del av uppvärmningsbehovet. Ventilationsförlusterna utgör vidare en allt större del av uppvärmningsbehovet. Klagomål framförs ofta på golvvärmesystemens svårigheter att klara stora väderomslag på grund av hög värmekapacitet.

Trenden att bygga hus med allt större fönster och glasytor och som går ända ner till golv har lett till ökad frekvens klagomål på komforten i hus med golvvärme jämfört med radiatorsystem, oavsett om huset har frånluftsventilation eller frånlufts-/tilluftsventilation. I förstnämnda fallet förstärks inverkan av kallras från väggventiler (uteluftsdon), vilket de boende ofta kompenserar med höjd innetemperatur. I andra fallet klagas man ibland på kalla golv genom att husen primärt värms med ventilationsluften p g a att tilluftstemperaturen är för hög samtidigt som värmeförlusten till golvslingorna reglerats ner eller stängts av. Några entreprenadföretag har också förbjudit golvvärme i flerbostadshus.

Resultaten från NUTEKs småhustävling, Jahnsson (1997, 1998) och Energimyndigheten (1999) visar att radiatorer med termostater ger den jämnaste innetemperaturen samt att värmesystemet skall vara placerat inomhus för att uppnå hög energieffektivitet. Man ifrågasätter också om så extremt tröga värmesystem som golvvärme är lämpliga för energieffektiva småhus med litet effektbehov och i vilka den okontrollerbara andelen gratisvärmets tillskott från processer, personer och solinstrålning kan ge ett mycket stort bidrag.

Hur stor andel av dessa tillskott som kan tillgodogöras beror i hög grad på hur snabbt värmesystemet kan anpassa sig till det aktuella behovet. Genom relativt sett större gratisvärmeandelar i allt energisnålare hus kan man med fog påstå att de blivit mer känsliga för människans beteende. Problemen med den stora värmekapaciteten förstärks naturligtvis av trenden mot allt större glasytor.

3.2 Projekteringsråd

3.2.1 Utgångspunkter

Nya småhus skall utformas för att ha god innemiljö, vara energieffektiva, medföra låga årskostnader (summan av bygg-, drift- och underhållskostnader) och ha ekologiskt hållbara lösningar. Erfarenheter visar att dessa målsättningar säkrast uppnås med enkla och beprövade lösningar, som är lätta att bygga, driva och underhålla. Speciellt gäller detta för valet av värme- och ventilationssystem.

3.2.2 Energieffektivitet - komfort

Beroende på husets och installationernas utformning varierar förhållandena i temperatur, luftflöden m m mellan olika ställen inne. Ur komfort- och energisynpunkt bör utformningen väljas så att klimatet inne blir så jämnt som möjligt. Alla rum förses med uppvärmning så att det blir jämn värme och samma komfortkänsla i hela huset. Isoleringens tjocklek och fördelning i olika byggdelar bör bli ske med hänsyn till respektive värmesystems särdrag. Om huset har golvvärme i stället för radiatorer bör t ex isolertjockleken omfördelas och ökas i golvet respektive minskas i taket.

De vanligaste klagomålen för hus med platta på mark är kalla och hårda golv. Egentligen är det inte låg ytemperatur på golvet utan hög värmeavledning från foten till golvet, som gör att man fryser om fötterna. Ytemperaturen på golvet är i praktiken nästan alltid högre än 16 °C i nya hus.

En byggnad är ett relativt värmetrögt system. Ju energisnålare huset i sig är desto större relativ betydelse har gratisvärmets från sol, belysning, personer etc. Energieffektiva och komfortabla värmesystem skall vara placerade så nära klimatskärmens insida som möjligt och snabbt kunna anpassa sig till det aktuella värmebehovet pga variationer i klimat- och värmebelastning för att möjliggöra ett högt gratisvärmeutnyttjande och minska problemen med övervärme/övertemperaturer. Energieffektiva och komfortabla värmesystem skall ha liten värmekapacitet och noggrann styrning av värmeförseln, t ex utetemperaturstyrd framledningstemperatur samt rums-/radiatortermostat för begränsning av värmeförseln och högt gratisvärmeutnyttjande.

3.2.3 Värmeförluster - gratisvärme

Bättre värmeisolering i tak, väggar och golv samt större fönsterytor ökar komfortskillnaderna inom huset. Gratisvärmets kan därmed relativt sett täcka en allt större del av byggnadens värmebehov, vilket därmed i allt högre grad utgörs av ventilationsförluster och värmeförluster genom glasytor.

Komfortproblem kan uppstå t ex under stora och värmeslukande fönster eller nära väggventiler, där kall uteluft tas in i frånluftsventilerade hus respektive nära tilluftsdon i

frånlufts-/tillluftsventilerade hus. Värmebehovet är extra stort på dessa ställen, varför det lokalt kan krävas förhöjd vämeavgivning inom dessa områden. Hur bra fönstren än är, känns det i första hand som om kylan tränger in genom dessa. Fönstrets ytemperatur är relativt låg vid (sträng) kyla oavsett hur bra fönstren än är. Detta orsakar skallras och kallstrålning (strålningsdrag). Luften inne nära glasytan kyls och faller ner på golvet skallras. Luftrörelser större än 0,15 m/s uppfattar de flesta människor som drag. Strålningsdrag är egentligen den värmestrålning som sker från en kropp med högre temperatur, t ex från en människa till ett fönster. Då temperaturskillnaden når ett visst värde uppstår en känsla av drag.

3.2.4 Ventilation - glasytor

Ventilationssystemet skall utformas så att hög termisk och hygienisk komfort säkerställs. Framst är det utelufts- och tilluftsdonens placering och egenskaper i frånlufts- respektive frånlufts-/tillluftsventilerade hus, som måste beaktas bl a för att uppnå god luftspridning och för att undvika dragproblem i görligaste mån.

Ventilationen måste kunna garanteras i täta hus. Detta uppnås säkrast med mekanisk ventilation. Trenden att bygga hus med allt större fönsterytor och som går ända ner till golv har lett till ökad frekvens klagomål på komforten i hus med golvvärme jämfört med radiatorsystem, oavsett om huset har frånluftsventilation eller frånlufts-/tillluftsventilation. I förstnämnda fallet förstärks inverkan av kallras från väggventiler (uteluftsdon), vilket de boende kompenserar med höjd innetemperatur. I andra fallet klagar man ibland på kalla golv genom att huset primärt värms med ventilationsluften på grund av att tilluftstemperaturen är för hög samtidigt som värmeförlusten till golvslingorna reglerats ner eller stängts av.

Ur komfortsynpunkt bör fönsterytor begränsas och höga fönster undvikas. Minst 300 mm hög fönsterbröstning rekommenderas och så energisnåla fönster som möjligt väljs. Uteluftsdon som väggventiler i frånluftssystem väljs med så goda luftspridningsegenskaper som möjligt. För att fånga upp kallraset placeras väggventiler över radiatorerna och fönstren. I golvvärmda hus med frånluftsventilation placeras väggventiler vid sidan av fönstren så att inte kallraset från dessa förstärks. I golvvärmda hus med frånlufts-/tillluftsventilation är det viktigt att tilluftsdonen i taket inte placeras för nära fönstren, så att inte kallraset från fönstren förstärks. Dessutom måste tilluftstemperaturen i frånlufts-/tilluftssystem begränsas till 15 å 17 °C för att man primärt inte skall värma huset med ventilationssystemet.

3.2.5 Golvvärme

Traditionella konstruktioner för golvvärme vid platta på mark med underliggande isolering och värmerören i underkant av plattan måste isoleras avsevärt bättre med minst 20 cm cellplast e likv och med tillräcklig kantisolering. Vidare måste golvvärmekonstruktionen ha mindre värmekapacitet genom att en del av isoleringen läggs på betongplattans översida och värmerören flyttas upp nära överytan.

Golvvärme är känslig för variationer i värmebehov. Lokalt, t ex nära fönster, kan därför extra åtgärder behöva vidtas för att öka värmeförlusten pga stora luftrörelser, kallras, strålningsdrag m m beroende på glastyper, placering och typ av väggventiler m m. I områden med extra stora värmeförluster bör radiatorer placeras eller golvvärmerören läggas tätare, dock ej tätare än att ytemperaturen på golvet överstiger 27 °C. Slingans tillopp kan med fördel placeras där värmebehovet är störst. Inverkan av strålningsdrag nära fönster kan

minskas t ex med värmereflekterande glas eller golvvärmslingor i fönsterbröstningen. För att motverka kallras kan man vidta särskilda åtgärder t ex golvvärmslinga i bröstningen under fönstret, radiator under fönstret eller tätare mellan golvvärmerören.

Golvtemperaturen ca 23 °C är den temperatur som 95 % av människorna är nöjda med då de har strumpor eller sockar på fötterna, Gundersen (2001). Detta motsvarar en värmeavgivning till rummet på 20 - 30 W/m² och leder i nya hus till innetemperaturen 20 - 21 °C .

Temperaturer inom intervallet 19 - 26 °C säger sig 85 % av människorna vara nöjda med. Ett bräd- eller parkettgolv med större tjocklekar än 20 mm har betydande värmemotstånd som medför ökade förluster nedåt och att upp till 5 á 10 °C högre värmemediatemperatur erfordras, Harrysson (2000).

4. TERMISKT INNEKLIMAT

4.1 Inverkande faktorer

Introduktion

Byggandet blir allt mer komplicerat. Nya material och konstruktioner med delvis ökända egenskaper används i ökad utsträckning. Bättre isolerade tak, väggar, fönster och golv tillsammans med större glasytor medför större komfortskillnader mellan olika delar i rummet och huset. Golvvärmesystem med hög värmekapacitet i kombination med mindre lämplig placering av uteluftsdon (väggventiler) och tilluftsdon har accentuerat nämnda problem.

Skärpta värmehushållningskrav har medfört nya hus med andra värmetekniska egenskaper än äldre. Relationerna mellan olika förlust- och tillskottsposter i energibalansen är, som framgår av kapitel 6, kraftigt förändrade. Andelen momentant verkande värmebelastningar har ökat relativt sett med ökad risk för inneklimatproblem och större variationer i innetemperatur som följd. Byggnaders värmetröghet måste beaktas i ökad utsträckning om man vill uppnå god innemiljö och effektiv energianvändning. Ju mer innetemperaturen tillåts variera desto högre blir gratisvärme- och värmekapacitetsutnyttjandet. Människan är känslig för komfortskillnader t ex med avseende på temperaturer och luftrörelser.

I första hand bör man eftersträva bygg- och installationssystem med bl a följande egenskaper:

- Minimerar komfortskillnader inne
- Har snabbreglerat värmesystem placerat på klimatskärmens insida
- Minskar klimatpåverkan inne av variationer i uteklimat och gratisvärme.
- Skikt i byggnadsstommen med hög värmekapacitet placeras så nära inneluften som möjligt

Innemiljöfrågorna avgränsas i detta projekt till att omfatta det termiska inneklimatet. Detta definieras huvudsakligen av parametrarna:

- lufttemperatur
- strålningstemperatur
- lufthastighet
- relativ luftfuktighet (Anm. sekundär parameter i bostäder)

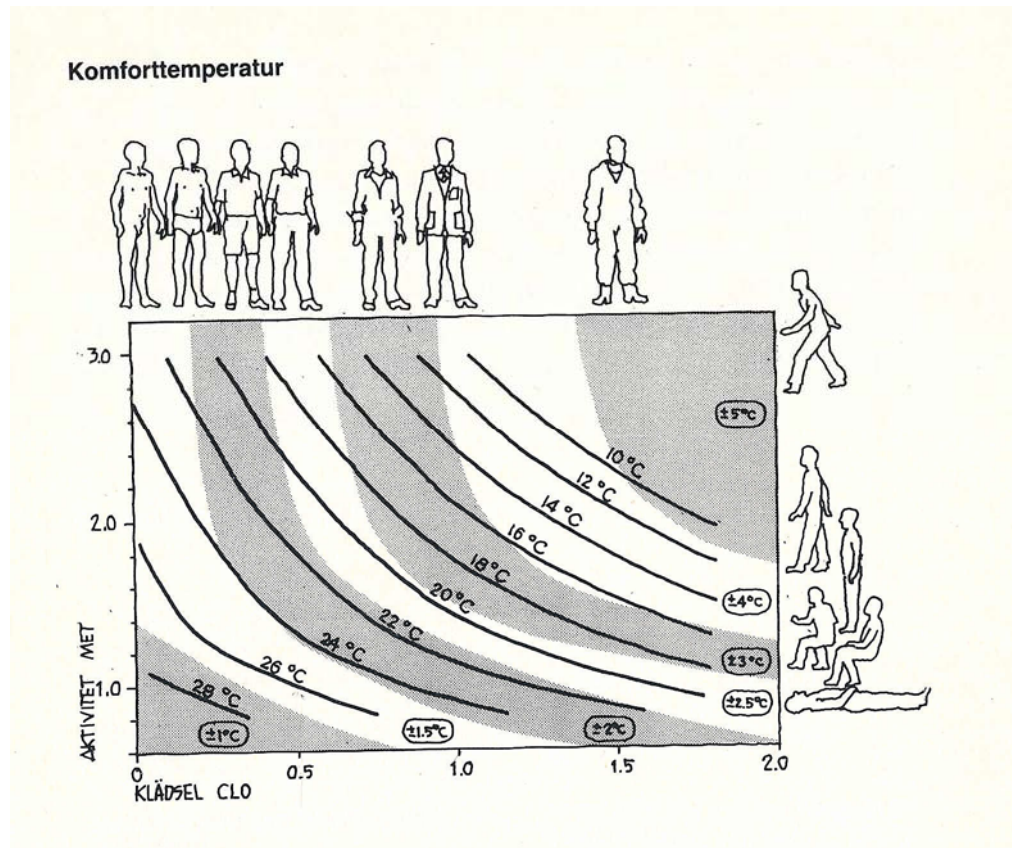
Begrepp som används för att karakterisera det termiska inneklimatet (termiska komforten) är t ex operativ temperatur (sammanvägt värde av luft- och strålningstemperatur, Magnusson & Qvist (1990). Ett annat mer relevant begrepp är ekvivalent temperatur.

Ekvivalent temperatur och komforttemperatur

Den temperatur man upplever kallas ekvivalent temperatur och är den sammanvägda inverkan av luft- och strålningstemperaturer samt luftrörelser. Hur mycket kläder man har på sig respektive aktiviteten beror naturligtvis på vilken temperatur som anses vara trivsamt och komfortabel. Klädernas inverkan på den termiska upplevelsen betecknas med storheten clo (från engelskans clothes) medan aktivitetens inverkan har storheten met (från metabolism).

För varje kombination av klädsel och aktivitet finns ett optimalt termiskt klimat som är lika med den ekvivalenta temperaturen vilken störst antal personer finner komfortabelt. Denna temperatur kallas komforttemperatur. Önskat termiskt klimat, aktivitet och klädsel har

bestämts genom omfattande försök där tusentals personer medverkat. Värdena på komforttemperaturer erhålls ur diagrammet, figur 4.1, som är hämtad ur ISO 7730. Angivna toleranser är föreslagna acceptabla toleranser som motsvarar 90 % nöjda.

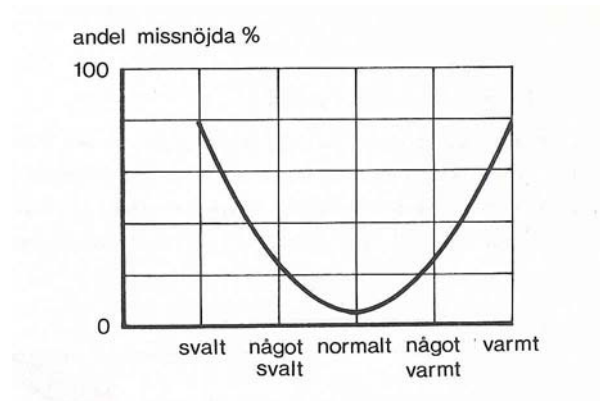


Figur 4.1 Komforttemperaturer, Magnusson & Qvist (1990).

Ett komfortabelt termiskt klimat måste vara så homogent som möjligt dvs med så små temperaturskillnader som möjligt såväl horisontellt som vertikalt mellan olika ställen inom rummet. Ett förenklat sätt att beskriva detta på är att skillnaden mellan ekvivalent temperatur i huvud- och fothöjd bör vara mindre än 3 °C. Dessutom är det inte bra om ekvivalent temperatur är mer än 1,5 °C lägre än operativ temperatur, eftersom luftrörelsernas kylande inverkan då ger risk för "dragbesvär".

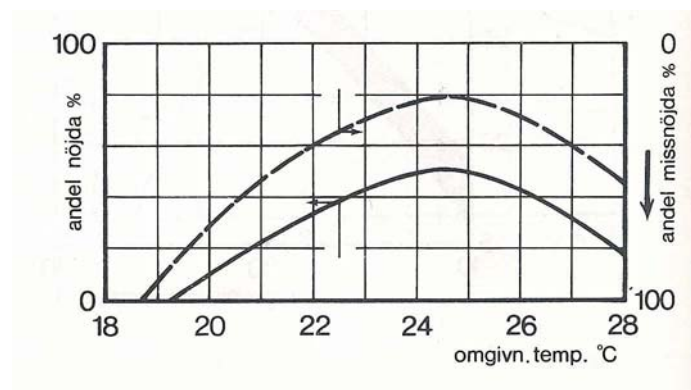
Lämpligt inneklimat

Fysiologiskt sett är människor rätt lika varandra. Ingen klimatsituation inne tillfredsställer dock alla, men klimatsituationer finns som tillfredsställer så många som möjligt, figur 4.2. Dessa förutsättningar bör man alltid ha i tankarna när den bästa lösningen eftersträvas för "rätt inneklimat". Många individuella åsikter finns om hur klimatet bör vara. Rimliga möjligheter bör därför finnas för att kunna anpassa klimatet till individen. Blotta vetskapen om att det går att påverka ett klimat gör att det upplevs som positivt, medan fixerade låsta klimat ofta upplevs negativt.



Figur 4.2 Andel missnöjda med det termiska klimatet som funktion av "medelåsikten", Peterson (1980).

Temperaturen i en bostad bör ligga mellan 20 och 23 °C för att så bra som möjligt passa aktiviteter som pågår där. Innetemperaturen mellan olika lägenheter antas vanligen vara normalfördelad och standardavvikelsen uppges av Peterson (1980) till 1,5 °C. Därmed antas 90 % av lägenheternas innetemperatur ligga inom dubbla standardavvikelsen, 3 °C. Peterson (1980) har studerat vad ett antal patienter anser om rumsklimatet i ett sjukhus, figur 4.3.



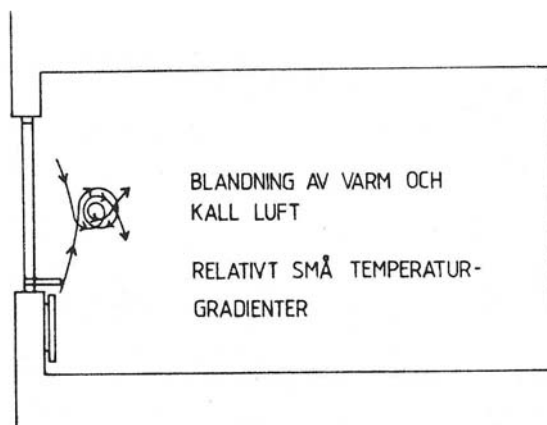
Figur 4.3 Antal patienter i ett sjukhus som anser rumsklimatet behagligt respektive obehagligt vid olika omgivningstemperaturer (mätt med globtermometer), Peterson (1980).

Då man omväxlande vilar, utför lättare eller tyngre arbete bör klädseln anpassas till temperaturen inne. Temperaturer under 20 °C kommer några att känna som för kallt när de sitter stilla. Detta kommer i synnerhet att märkas på fingrar och fötter. Vid temperaturer under 20 °C får man därför vara extra varmt klädd, när man skall sitta en längre tid. På golvet är temperaturen ofta 1 - 2 °C lägre än i normal stolshöjd, vilket måste beaktas om barn leker på golvet. Personer med dålig blodcirkulation eller reumatiska sjukdomar behöver varma kläder. I dessa sammanhang måste man ha möjlighet att kunna hålla högre rumstemperatur.

Det får inte vara dragigt, dvs lufthastigheten får inte vara högre än 0,15 m/s, vilket ungefär motsvarar rökens hastighet precis ovanför en brinnande cigarett i stillastående luft. Om man står eller går kan 0,2 - 0,3 m/s dock kunna godtas.

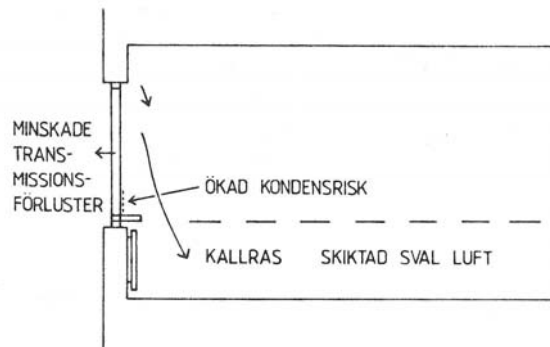
Problem med kyla och drag i äldre bostäder har ofta flera orsaker. Det kan vara både värmestrålning till de kalla fönstren, drag (höga lufthastigheter), stor skillnad på temperaturer mellan huvud och fötter samt för låg temperatur. Felen beror nästan alltid på en kombination av otäta fönster och dörrar eller dåligt isolerade golv och väggar alternativt i närheten av ställen där det kommer in ventilationsluft. I nya hus kan problemen bero på stora glaspartier, att radiator saknas under fönstret samt att ett uteluftsdon (väggventil för intag av kall uteluft) finns över fönstret.

Värmeanläggningen bör kunna regleras. Den bör t ex vara försedd med rums- eller radiatortermostat, så att uppvärmningen kan avbrytas i de olika rummen, när temperaturen blir för hög. Under perioder med kontinuerlig uppvärmning får man relativt små temperaturgradienter i rummet. Vid fönster kan det uppstå kallras. När det är kallt utanför avkyls luften på insidan av fönsterrutan och faller ned. Luften strömmar in i rummet och kan ge störande drag. Den kalla luften från fönstertytan möter en varm uppåtgående luftström från radiatoren, figur 4.4, varvid dessa luftströmmar blandas. Störande ensidig avkyllning av kroppen genom värmestrålning förekommer normalt inte i bostäder byggda och isolerade enligt gällande regler. Normalt kommer det därför inte heller att uppstå temperaturskillnader mellan huvudet och fötterna, som överstiger 3 °C. Det är gränsen för vad som anses vara behagligt.



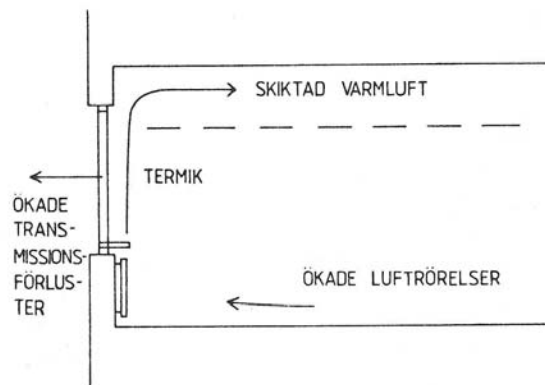
Figur 4.4 Kontinuerlig uppvärmning, Harrysson (1985).

Under avsvalningsfasen, då radiatoren är avslagen, kan kallras uppträda vid fönster och yttervägg, figur 4.5. Detta kallras, som kan förstärkas av att uteluft tas in genom fönster och väggventil, kan ge upphov till större temperaturgradienter och en ogynnsam temperaturfördelning, t ex i form av kalla golv. En ytterligare nackdel är att risken för kondens på glasets insida ökar. Positivt är dock att transmissionsförlusterna minskar.



Figur 4.5 Avsvältningsfasen vid periodvisa temperatursänkningar, Harrysson (1985).

När man önskar återgå till normal temperatur, erfordras ett ökat värmetillskott för att höja temperaturen hos rumsluften och rummets ytmaterial. Denna kraftiga uppvärmning ger naturligtvis också upphov till stora luftrörelser och en viss skiktning av varm luft överst i rummet, figur 4.6. Den varma luftströmmen från radiatoren ger upphov till ökade transmissionsförluster, främst genom fönster, och i vissa fall ökade ventilationsförluster. Det är inte säkert att nämnda ökning helt kompenseras av de minskade förluster som uppstår under avsvältningsfasen. Med hänsyn till risken för ökade ventilationsförluster under uppvärmningsfasen kan det vara en fördel om fläktkapaciteten reduceras under detta skede.



Figur 4.6 Uppvärmningsfasen vid periodvisa temperatursänkningar, Harrysson (1985).

4.2 Termiska komfortkrav

De termiska komfortkrav som skall vara uppfyllda i vistelsezonen är enligt Boverkets Byggregler (1999) och tillhörande vägledning, Hector (1996):

- Lufthastigheten får inte överstiga 0,15 m/s.
- Inneluftstemperaturgradienten får vara högst 1,5 °C mellan 0,1 och 1,1 m över golv.
- Ytemperaturen på golvet får vara högst 27 °C och lägst 16 °C, i hygienrum lägst 18 °C och i lokaler avsedda för barn lägst 20 °C .

- Den operativa temperaturen (medelvärde av luft- och strålningstemperaturen) under uppvärmningssäsongen skall ligga inom intervallet 20 ± 2 °C .
- Den ekvivalenta temperaturen (inverkan av operativ temperatur och lufthastighet) skall vara 22 °C med variationer inom intervallet 20 - 24 °C.
- Den beräknade riktade operativa temperaturen får vara lägst 18 °C i bostads- och arbetsrum samt 20 °C i hygienrum och vårdlokaler, i rum för barn i daghem, förskolor och för äldre i servicehus o d.
- Skillnaden i beräknad riktad operativ temperatur mellan olika punkter i rummets vistelsezon får vara högst 5 °C.

5. VÄRMETRANSPORT

Innehållet i detta kapitel baseras huvudsakligen på uppgifter hämtade och bearbetade från Harrysson (1988) och Sandin (1990).

5.1 Värmegenomgångskoefficient

Vid tillämpade beräkningar används ofta begreppet värmegenomgångskoefficient för en byggnadsdel. Ett annat namn på samma sak är U-värde (tidigare k-värde). Detta definieras som den värmemängd som per tidsenhet passerar genom en ytenhet av väggen då skillnaden i lufttemperatur på ömse sidor om väggen är en grad. Värmeflödet q genom en byggnadsdel kan således tecknas

$$q = U \cdot (T_i - T_u) \quad (\text{W/m}^2 \text{ K}) \quad (5.1)$$

där U = värmegenomgångskoefficient $(\text{W/m}^2 \text{ K})$
 T_i = innetemperatur (K)
 T_u = utetemperatur (K)

$$U = 1 / (R_i + R_1 + R_2 + \dots + R_N + R_u) \quad (\text{W/m}^2 \text{ K}) \quad (5.2)$$

där R = värmeövergångsmotstånd på insidan $(\text{m}^2 \text{ K/W})$
 $R_1 - R_N$ = värmemotstånd för de olika väggsnitten 1, 2, .. N $(\text{m}^2 \text{ K/W})$
 R_u = värmeövergångsmotstånd på utsidan $(\text{m}^2 \text{ K/W})$

5.2 Stationära förhållanden

Värmeströmmen genom en byggnadsdel kan ofta med god noggrannhet antas vara endimensionell. Beräkningssvårigheter uppstår exempelvis om köldbryggor, fönster, luftläckage, värmelagring och inventarier framtvingar avvikelser från endimensionell värmeströmning. Vid byggnadens hörn uppstår också avvikelser. Inverkan av dylika faktorer kan studeras genom noggrannare beräkningar av respektive delproblem. Problem av typen två- eller tredimensionell värmeströmning analyseras med datorbaserade beräkningsmetoder eller överslagsmetoder inriktade på handberäkningar. Framställningen i det följande avser endimensionell värmeströmning.

Den transmitterade värmeeffekten strömmar genom byggnadens klimatskärm och inre rumsbegränsningar. Storleken beror på temperaturskillnader mellan byggnadsdelarnas begränsningsytor, byggnadsdelarnas förmåga att släppa igenom värme, värmegenomgångskoefficienten U samt på begränsningsytornas storlek. Transmitterad värmeeffekt, P_{trj} , för byggnadsdel j beräknas enligt

$$P_{trj} = U_j \cdot Y_j \cdot (T_{Bo} - T_{Ao}) \quad (\text{W}) \quad (5.3)$$

där U_j = värmegenomgångskoefficienten för byggnadsdel j $(\text{W/m}^2 \text{ K})$
 Y_j = ytan hos byggnadsdel j (m^2)
 T_{Bo} = ytans B medeltemperatur (K)
 T_{Ao} = ytans A medeltemperatur (K)

5.3 Instationära förhållanden

Många värmeströmningsproblem kan med hyfsad noggrannhet behandlas med antagande om att stationär värmeströmning råder, dvs där temperaturen alltså inte ändrar sig med tiden. I verkligheten är det ytterst sällan det verkligen råder stationära förhållanden. Då temperaturen varierar tämligen långsamt kan man med god approximation försumma tidsfaktorn. Vid (rena) uppvärmnings- och avsvålningsförlopp måste man dock ta hänsyn till tidsvariationen.

Vissa relativt enkla fall av instationär värmetransport kan lösas analytiskt utifrån Fouriers värmeledningsekvation

$$\partial T / \partial t = \kappa \cdot \partial^2 T / \partial x^2 \quad (5.4)$$

där κ = värmediffusivitet (m²/s)
 T = temperatur (K)
 t = tid (s)
 x = längd (m)

Värmediffusiviteten κ ges av

$$\kappa = \lambda / \rho \cdot c \quad (5.5)$$

där λ = värmekonduktivitet (W/m K)
 ρ = densitet (kg/m³)
 c = värmekapacitet per massenhet (Ws/kg K)

Värmediffusiviteten κ kan ses som ett mått på hur snabbt en temperaturändring fortplantar sig in i ett material. Ett högt κ -värde medför en snabb inträngning. Exempel på värmediffusivitet för några olika material ges i tabell 5.1.

Tabell 5.1. Värmediffusivitet κ för några material (Sandin 1990).

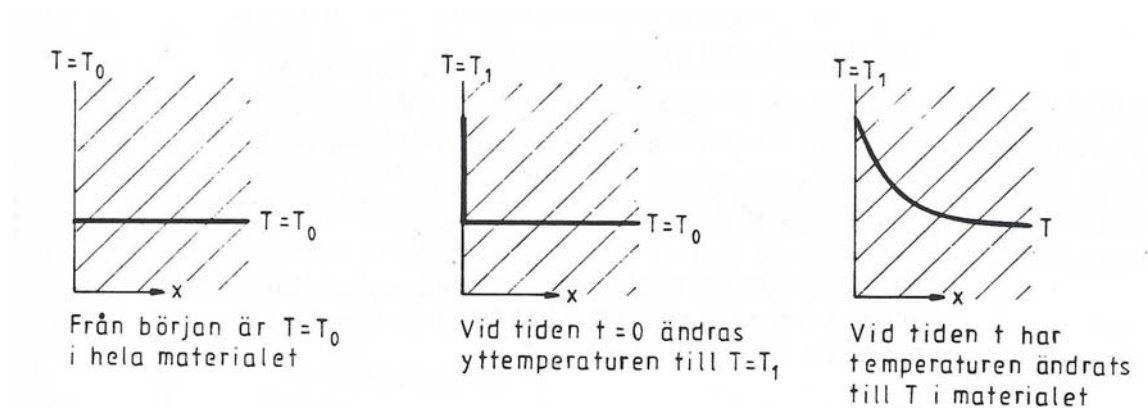
Material	$\kappa \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
koppar	115
stål	15
granit	1,6
betong	0,9
tegel	0,5
lätbetong	0,3
mineralull ($\rho = 150$)	0,3
mineralull ($\rho = 15$)	3,3

Värmeflödet q vid ytan efter en stegändring av yttemperaturen i en halvoändlig skiva ges av

$$q = \lambda \cdot (T_1 - T_0) / \sqrt{\pi \cdot \kappa \cdot t} \quad (5.6)$$

där T_0 = materialets temperatur från början vid tiden $t = 0$
 T_1 = yttemperaturen ändras till T_1 vid tiden $t = 0$

Parametern $\lambda/\sqrt{\kappa}$, kallas ofta värmeinträgningskoefficienten b , är en ren materialkonstant och kan uppfattas som ett uttryck för "värmemagasineringsförmågan". Enligt (5.6) blir värmeflödet vid tiden $t = 0$ oändligt stort. Detta är självklart omöjligt och beror på att ytmotstånden försummas.



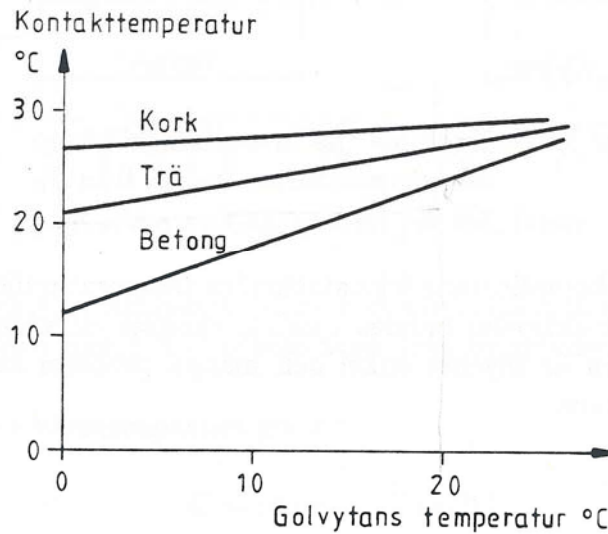
Figur 5.1. Förloppet vid ändring av yttemperaturen i "halvoändlig skiva".

Då två kroppar med oändlig utsträckning bringas i kontakt med varandra blir kontaktytans temperatur

$$T = (b_1 \cdot T_1 + b_2 \cdot T_2) / (b_1 + b_2) \quad (\text{K}) \quad (5.7)$$

där b_1 och b_2 = kropparnas 1 och 2 värmeinträgningskoefficient $(\text{J}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2})$
 T_1 och T_2 = kropparnas 1 och 2 ursprungliga temperatur (K)

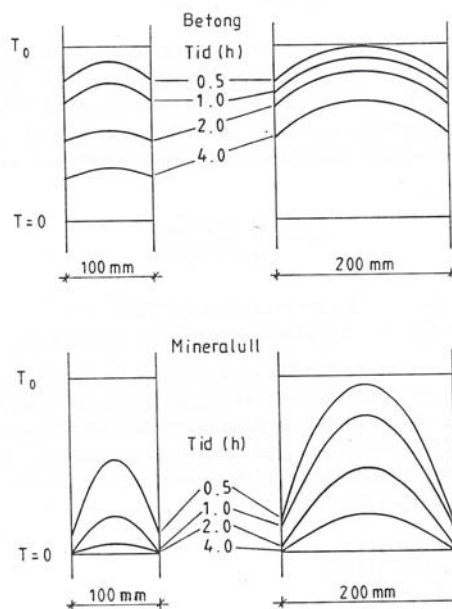
Med uttrycket (5.7) kan man t ex uppskatta kontakttemperaturen mellan en oklädd fot och olika golvbeläggingsmaterial. Även om detta har liten tjocklek gäller uttrycket (5.7) så länge temperaturstörningen inte nått golvbeläggningens baksida. Vid normal gång på ett golv är kontakttiden så kort att detta gäller. I figur 5.2 visas kontakttemperaturen mellan en oklädd fot och olika golvbeläggningar med olika temperatur.



Figur 5.2. Kontakttemperatur mellan oklädd fot och olika golvmaterial.

Figur 5.2 stämmer helt med vad som upplevs som varma eller kalla golv. Ett betonggolv upplevs som kallt medan en korkbeläggning upplevs som varm. Detta gäller även om temperaturen på golven är densamma.

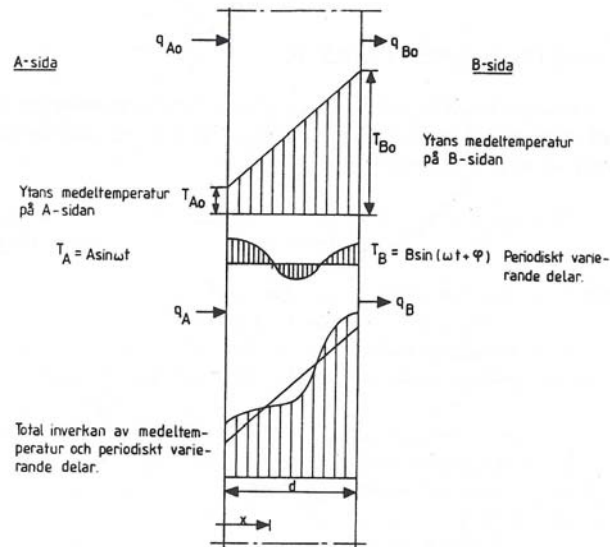
I figur 5.3 visas några exempel på hur temperaturprofilerna kan variera med tiden då även ytmotstånden beaktas. Utgångstemperaturen har varit T_0 i hela väggen och i luften. Vid tiden $t = 0$ sänks temperaturen till 0 i luften.



Figur 5.3. Exempel på avsvlningsförlopp då temperaturen ändrar form från T_0 till 0.

Vid instationära förhållanden inverkar värmekapaciteten på effekt- och energianvändningen. Moderna byggnadskonstruktioner är vanligtvis uppbyggda i flera skikt som har olika

egenskaper med avseende på bärighet, värmeisolering, täthet, fuktskydd, ytfinish etc. Genom att på lämpligt sätt kombinera och inbördes placera ingående material i olika byggnadsdelar kan man utnyttja värmekapacitetens möjligheter att gynnsamt påverka effekt- och energianvändningen.



Figur 5.4. Homogent skikt med harmoniskt varierande uttemperatur $A \cdot \sin \omega t$ på A-sidan. Carslaw & Jaeger (1959), Granholm (1971b) och Harrysson (1988).

Vid endimensionell instationär värmeledning genom en byggnadsdel, figur 5.4, kan tillståndet beskrivas med en lösning av värmeledningsekvationen

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5.8)$$

där	T = temperatur på avståndet x	(K)
	x = avstånd från A-sidans yta	(m)
	κ = värmediffusivitet = $\lambda / \rho \cdot c$	(m ² /s)
	λ = värmekonduktivitet för materialet i skiktet	(W/m K)
	ρ = densitet	(kg/m ³)
	c = specifikt värme	(J/kg K)
	ω = vinkelfrekvens = $2 \cdot \pi / t_0$	(rad/s)
	t = tid	(s)
	t_0 = periodlängd	(s)
	d = tjocklek	(m)

Temperaturoberoende materialegenskaper antas råda. Temperaturtillståndet i en byggnadsdel, här exemplifierad som ett skikt med godtycklig tjocklek d , figur 5.4, kan representeras av en rät linje, överlagrad med en högregradskurva. Värmeflödet genom skiktet under inverkan av differenser mellan de kontanta yttemperaturerna T_{A0} och T_{B0} blir stationärt. En rät linje visar hur temperaturen i detta fall varierar genom skiktet i väggen.

Vid variabla yttemperaturer T_A och T_B på A- och B-sidan induceras dämpade temperaturvågor. Om temperaturen T_A på ytan A skrivs som

$$T_A = A \cdot \sin \omega t \quad (5.9)$$

där A = amplitud (K)

blir lösningen på (5.8) relativt enkel. Man kan sedan beräkna skiktets temperatur på B-sidan och därmed lufttemperaturen om värmeövergångskoefficienten är känd.

Differentialekvationen (5.8) kan lösas genom att introducera begreppet komplexa tal, Harrysson (1988). Minst två av parametrarna värmeflöde och yttemperatur på byggnadsdelens ytor måste vara kända.

Bestämning av temperaturförhållanden och värmeflöden m för ett skikt med godtycklig tjocklek leder till relativt komplicerade beräkningar som framgår av Harrysson (1988). Avsevärda förenklingar nås emellertid om konstruktionen kan betraktas som ett skikt med oändlig tjocklek.

Den största värmemängd $W_{A\infty}$ som under sådana förhållanden kan magasineras under en halvperiod med värmeflödet $q_{A\infty}$ hela tiden överstigande sitt medelvärde uppgår till

$$A \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot t_0 / \pi} \quad (\text{W/m}^2) \quad (5.10)$$

där b = värmeinträgningskoefficienten = $\lambda \cdot \rho \cdot c$ ($\text{J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C s}^{1/2}$)

Värmeflödet ligger fäsförskjutet $\pi/4$ före temperaturen. I tabellerna 5.2 och 5.3 ges värmetekniska egenskaper, värmeinträgningskoefficienter och maximalt magasinerad värmemängd för några vanligen förekommande byggmaterial och periodlängder vid temperaturamplituden 1 K.

Tabell 5.2. Värmeledningsförmåga λ , specifikt värme c , densitet ρ , värmediffusivitet κ och värmeinträgningskoefficient b för några vanligen förekommande byggmaterial, Harrysson (1988).

Material	λ $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	c $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	ρ kg/m^3	$\kappa \cdot 10^{-7}$ m^2/s	$b = \sqrt{\lambda c \rho}$ $\text{J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2}$
Mineralull	0,04	750	30	17,8	30
Lättbetong	0,15	1050	510	2,8	283
Betong	1,70	880	2300	8,4	1855
Trä (\approx spånskiva)	0,14	2300	500	1,2	401
Gips	0,22	800	900	3,1	398
Luft	0,025	1010	1,28	193,4	5,7

Tabell 5.3. Maximalt magasinerad värmemängd m , för några vanligen förekommande byggmaterial och periodlängder vid temperaturamplituden $1\text{ }^\circ\text{C}$, Harrysson (1988).

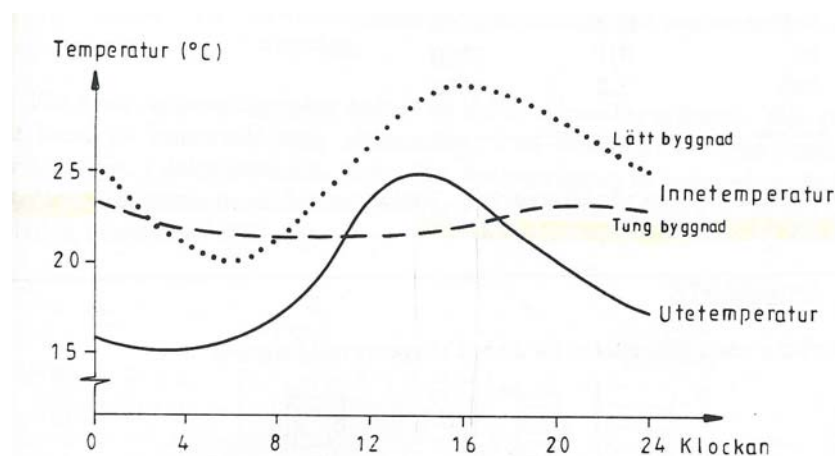
Material	Maximalt magasinerad värmemängd, W_{A_∞} , ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$) vid periodlängden (h)				
	1	12	24	72	120
Mineralull	1,44	5,00	7,07	12,25	15,84
Lättbetong	13,60	47,07	66,67	115,47	149,35
Betong	89,18	308,62	437,14	757,13	979,20
Trä (\approx spånskiva)	19,29	66,74	94,53	163,71	211,73
Gips	19,15	66,23	93,82	162,50	210,15

5.4 Värmekapacitet

5.4.1 Introduktion

Av temperaturprofilen i figur 5.5 framgår att olika material "dämpar" plötsliga temperaturvariationer i luften på olika sätt. I betongen sker temperaturändringen mycket långsammare än i mineralullen. Betongen kan sägas ha ett stort värmemagasin. För byggnader innebär detta att en betongstomme har en temperaturtjämnande effekt. Vid ett tillfälligt avbrott i värmeförseln via uppvärmningssystemet kommer inneluftens temperatur inte att sjunka lika snabbt som med "mineralullsväggar". Betongen har ett stort värmemagasin och kommer att fungera som en värmekälla. Betongen har samma funktion vid dygnsvariationer i uteklimatet.

I tunga byggsystem kan stora värmemängder magasineras. Dyliga system sägs ha hög värmekapacitet. I lätta byggsystem är däremot värmekapaciteten liten, varför yttre temperaturstörningar slår igenom snabbt. Förhållandena illustreras av figur 5.5.



Figur 5.5. Inverkan av byggsystem på innetemperaturen, Sandin (1990).

5.4.2 Total värmekapacitet

En byggnads värmekapacitet C är den värmemängd, som åtgår för att höja byggnadsdelens temperatur med 1 K eller som avges från byggnadsdelen om dess temperatur sänks 1 K. En byggnadsdels värmekapacitet ges av

$$C = m \cdot c \quad (\text{Ws/K}) \quad (5.11)$$

där m = byggnadsdelens massa (kg)
 c = värmekapacitet per massenhet (specifik värmekapacitet) (Ws/kg K)

Består byggnadsdelen av flera olika material erhålls den totala värmekapaciteten genom att summera de olika materialens värmekapacitet. I tabell 5.4 ges några exempel på värmekapacitet per massenhet för olika byggnadsmaterial.

Tabell 5.4. Ungefärliga värden på värmekapacitet per massenhet, c , för vanliga material, Sandin (1990).

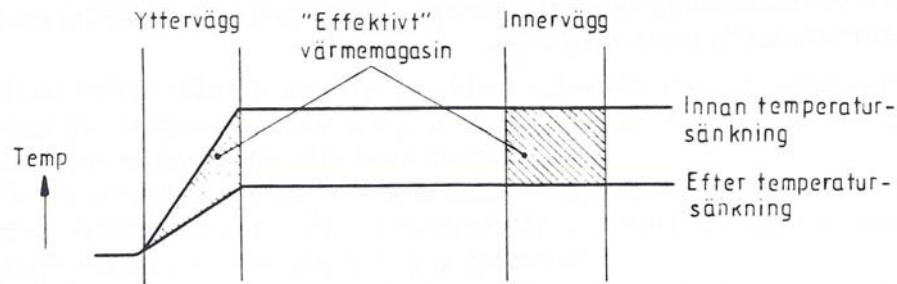
Material	ρ (kg/m ³)	c (Ws/kg K)
betong	2 300	900
tegel	1 500	800
lättbetong	500	1 000
stål	7 800	500
trä	500	1 500
gips	900	800
mineralull	15 150	800
vatten	1 000	4 200
is	917	2 200
luft	1,2	1 000

Observera vattnets höga värmekapacitet. Detta medför bland annat att ett ökande fukttinnehåll ger en ökande värmekapacitet.

5.4.3 Aktiv värmekapacitet vid periodiska temperatursvängningar

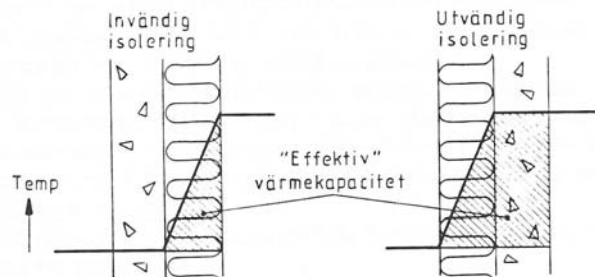
Introduktion

Ytterväggar och inre byggnadsdelar (med inneklimat på båda sidor) svalnar inte på samma sätt vid en temperatursänkning inne. En större del medverkar för inre byggnadsdelar eftersom båda ytorna har samma temperatur från början. Ytterväggar däremot har från början en temperaturgradient och väggens skikt får olika inverkan. Figur 5.6 visar skillnaden principiellt.



Figur 5.6. Skillnad i aktiv värmekapacitet mellan ytter- och innervägg, Sandin (1990).

För ytterväggarna inverkar endast en del av värmekapaciteten. Hur stor denna del blir beror på konstruktionens utformning. I en invändigt isolerad betongvägg betyder betongen i detta avseende föga. Om betongväggen är isolerad utvändigt kommer betongen däremot att medverka i hög grad. Skillnaden mellan utvändigt och invändigt isolering illustreras i figur 5.7.



Figur 5.7. Skillnader i aktiv värmekapacitet vid in- och utvändigt isolering, Sandin (1990).

Allmänt kan sägas att värmekapaciteten i inre byggnadsdelar är av mycket större betydelse än värmekapaciteten i klimatskärmen. Trähus svalnar i regel betydligt snabbare än stenhus, vilket huvudsakligen beror på att trähusets inre har mindre massa.

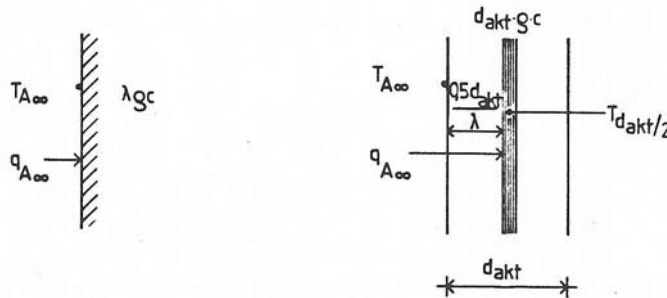
Om en byggnad snabbt skall kunna värmas upp, t ex kyrkor och sportstugor, går det åt mindre värme, om värmekapaciteten är liten. Väggarna bör ur denna synpunkt vara isolerade invändigt.

Vid förhållanden med stora dygnsvariationer i temperatur och solstrålning förekommer en påtaglig variation i värmeflöde in och ut från massiva byggnadsdelar. En stor del av den värme som tas upp vid ytterytan under dagen åtgår till att värma upp konstruktionen, medan endast en del förs vidare till inneluften. Man finner därför en tidsfördröjning mellan tiden för maximal yttemperatur och värmetillskott vid konstruktionens utsida samt tiden för maximal yttemperatur och värmeförlust vid konstruktionens insida. Samtidigt blir variationerna i temperatur och värmeflöde mindre vid konstruktionens insida för en tung vägg.

Ett skikt oändlig tjocklek

För praktiskt bruk är det med hänsyn till instationära värmeöverföringsproblems komplexitet angeläget att undersöka möjligheterna till förenkling av de tidigare angivna uttrycken för konstruktioner av godtycklig tjocklek bestående av ett eller flera skikt. Av den totala värmekapaciteten är enbart en del aktiv vid den under praktiska förhållanden pågående lagringen av energi. Den aktiva delens storlek och möjligheter till värmelagring bestäms bl a av byggnadsdelarnas utformning, de olika materialskiktens termiska egenskaper och inbördes placering samt periodlängden. Nämnade faktorer inverkar t ex vid solsken på så sätt att endast ett visst närmast utsidan beläget skikt av en yttervägg värms märkbart, trots att skiktet kan ha avsevärd tjocklek.

Man kan på ett förenklat sätt beroende på önskad beräkningsnoggrannhet beskriva ett ändligt materialskiktets egenskaper genom att ersätta det med ett oändligt tjockt skikt av samma material. Ett oändligt tjockt skikt låter sig omvänt representeras av en aktiv tjocklek $d_{akt} = \sqrt{2 \cdot \kappa / \omega}$.



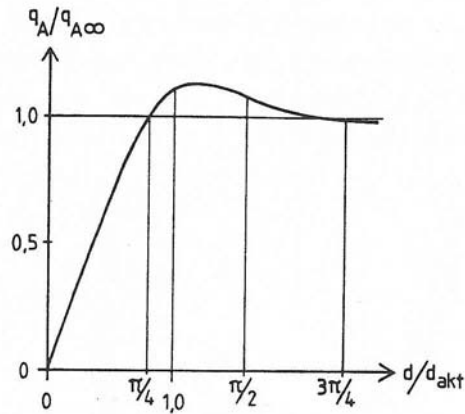
Figur 5.8. Modell för hur ett oändligt tjockt skikt kan representeras av den aktiva tjockleken, d_{akt} , Börresen (1972).

Värmemotståndet mellan ytan och värmelagret är $(d_{akt}/2) / \lambda$. Under förutsättning att temperaturpåverkan sker med vinkelfrekvensen ω kommer ytemperaturen $T_{A\infty}$ och värmeflödet genom ytan, $q_{A\infty}$, att vara exakt samma som för det oändligt tjocka homogena skiktet. Dettas hela värmekapacitet $d_{akt} \cdot \rho \cdot c$ räknat per ytenhet placeras i mitten av skiktet och värmeutbytet antas ske genom ytan. Den aktiva tjockleken kan sägas vara ett mått på hur långt in värmeöverföringen når i materialet. Värmeöverföringens våglängd δ för ett oändligt tjockt skikt kan tecknas enligt

$$\delta = 2 \cdot \pi / \beta \quad (\text{m}) \quad (5.12)$$

där $\beta = \sqrt{\omega / 2 \cdot \kappa} \quad (\text{m}^{-1})$

Redan när ett skikts tjocklek närmar sig fjärdedelen av våglängden, ett " $\pi/2$ "-skikt, kan man ur värmelagringssynpunkt tala om ett oändligt tjockt skikt.



Figur 5.9. Sambandet mellan relativa värmeflödet $q_A/q_{A\infty}$ och tjockleken d/d_{akt} , Börresen (1972).

Den maximala värmelagringen når man vid en något mindre tjocklek än $3 \cdot \pi \cdot d_{akt} / 8$. Då $d = d_{akt}$ ger modellen exakt samma respons som ett oändligt tjockt homogent skikt. I tabell ges aktiv tjocklek för vanliga byggnadsmaterial och periodlängden 24 timmar. I vanliga tegel- och betongkonstruktioner samt isoleringsmaterial medverkar ca 10 - 20 cm vid dygnssvängningar. Motsvarande tjocklek är 1 - 2 cm för de frekvenser som är aktuella vid studium av olika reglersystems noggrannhet enligt Börresen (1972).

Tabell 5.5. Aktiv tjocklek $d_{akt} = \sqrt{2 \cdot \kappa / \omega}$ för några vanliga byggnadsmaterial vid periodlängden 24 timmar, Harrysson (1988).

Material	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	c J/kg°C	$\kappa \cdot 10^{-7}$ m ² /s	$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$ J/m ² °C·s ^{1/2}	d_{akt} m
Mineralull	0,04	30	750	17,8	30	0,22
Lättbetong	0,15	510	1050	2,8	283	0,09
Betong	1,70	2300	880	8,4	1855	0,15
Trä (≈spånskiva)	0,14	500	2300	1,2	401	0,06
Gips	0,22	900	800	3,1	398	0,09
Luft	0,025	1,28	1010	193,3	5,7	0,73

Vid parameterstudier av värmekapacitetens inverkan på värmeflödet genom enskilda material och konstruktioner synes begreppet "aktiv tjocklek" snabbt ge information om vilka approximationer som kan vidtas för att förenkla beräkningarna. I samband med energibalansbestämningar måste dock beroende på problemtyp och önskad beräkningsnoggrannhet värmeflödets fasförskjutning hos den verkliga konstruktionen beaktas.

I flerskiktsskonstruktioner där ytskiktets tjocklek är större än den aktiva tjockleken kan det ändliga ytskiktet ersättas med ett oändligt tjockt skikt bestående av enbart ytskiktetsmaterial. Detta gäller oavsett vilka egenskaper det inre skiktet (material) har.

Jämförelser mellan approximativt och exakt beräknade värmeflöden för tunna ytskikt belägna utanför ett oändligt tjockt skikt redovisas av Börresen (1974a, b). Denne visar också hur man utifrån önskad beräkningsnoggrannhet och val av ytskikt med dominerande värmemotstånd eller värmekapacitet kan göra ytterligare förenklingar för tunna materialskikt.

Flera skikt. Godtycklig tjocklek

För att beräkna mer komplicerade instationära temperaturtillstånd används numeriska metoder. Konstruktionen indelas i skikt, varefter en värmebalans uppställs för varje skikt. För byggnadsdelar som består av flera skikt kan man använda den i figur 5.4 skisserade modellen genom att beräkna en matris som innefattar de olika skiktens egenskaper, Carslaw & Jaeger (1959) eller Johannesson (1981). Detta sker genom att multiplicera de olika skiktens respektive matriser med varandra, Harrysson (1988).

Modellering

Värmekapacitetens inverkan beaktas i effektbalansbestämningarna genom lagringsfaktorerna I respektive L och värmegenomgångsfaktorerna (dynamiska U -värdena) J respektive K . Faktorerna har beräknats för några vanliga material och konstruktioner. Numeriska värden återfinns i Harrysson (1988). Av dessa återges värden för J och L i bilaga 1. För att passa effektbalansens lösningsförfarande enligt TS-förfarandet anges respektive faktor till sitt absolutbelopp och fasförskjutning. Som framgår av de genomräknade exemplen kan värmeflöden i större eller mindre grad påverkas av värmeövergångskoefficienten beroende bland annat på skiktens värmetekniska egenskaper som värmeinträgningskoefficient och värmediffusivitet samt inbördes placering mellan skikten.

6. EFFEKT- OCH ENERGIBALANS

6.1 Energianvändning och variationer

Stora variationer mellan olika hus och tekniska lösningar

Energianvändningen varierar kraftigt mellan såväl nominellt lika som olika hus. Detta beror främst på:

- Skillnader i boendevanor, som kan medföra variationer på mer än 10 000 kWh/år mellan identiska hus.
- Kvalitetsvariationer i arbetsutförande, som kan medföra skillnader på cirka 5 000 kWh/år mellan identiska hus.
- Valet av teknisk lösning. Nedan diskuteras olika vanliga tekniska lösningar och energisparåtgärder.

Tekniskt sett beror energianvändningen på när huset har byggts samt på valda konstruktioner och installationer. Som framgår i det följande kan rätt teknisk lösning leda till ca 30 % lägre energianvändning och samtidigt god inomhusmiljö utan att byggkostnaderna ökar. Här görs endast en grov uppdelning i äldre småhus, byggda före oljekrisen 1974 och nya småhus byggda efter ca 1980. Exempel ges på vanliga lösningar och goda lösningar. Uppgifterna avser total energianvändning fördelat på energi till värmesystem, varmvatten och hushållsel. Ombyggnader av olika slag kan dock kraftigt påverka energianvändningen.

Eftersom så stora variationer förekommer och många faktorer inverkar föreligger avsevärda svårigheter att nå en god överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt energianvändning för det enskilda huset.

Energiuppgifter äldre småhus

Småhus med elvärme byggda före oljekrisen 1974 har normalt i medeltal den totala energianvändningen 25 000 kWh/år eller cirka 160 - 180 kWh/m² år för värmesystem, varmvatten och hushållsel. Energianvändningen antas i dylika hus vara fördelad på 15 000 kWh/år till värmesystemet, 5 000 kWh/år till varmvatten och 5 000 kWh/år till hushållsel. Energianvändningen för värmesystem och varmvatten motsvarar för oljeuppvärmning 4 m³ olja/år vid 50 % verkningsgrad och 3 m³ olja/år vid 67 % verkningsgrad.

Den energisnålaste grupp av äldre småhus som studerats i Boverksundersökningen, Harrysson (1994), har i medeltal den totala energianvändningen 18 000 kWh/år eller ca 120 kWh/m² år. Husgruppen karakteriseras av noggrant arbetsutförande, torrt byggande inomhus enligt volymelementmetoden, tvåglasfönster, självdragsventilation och direktverkande elradiatorer. Den avsiktliga ventilationen är låg, cirka 25 % av gällande normkrav.

Energiuppgifter nya småhus

Hus byggda sedan mitten på 1980-talet har normalt i medeltal den totala energianvändningen 13 000 - 15 000 kWh/år eller ca 130 kWh/m² år. Energianvändningen antas vara fördelad på 3 000 - 5 000 kWh/år till värmesystemet, 5 000 kWh/år till varmvatten och 5 000 kWh/år till hushållsel.

Det finns också goda lösningar, som ligger avsevärt lägre, cirka 10 000 kWh/år eller cirka 90 kWh/m² år. Energianvändningen antas då vara fördelad på 5 000 kWh/år till värmesystem och

varmvatten samt 5 000 kWh/år till hushållsel. Tre husgrupper i Boverksundersökningen, Harrysson (1994), ligger på denna energinivå. Husgrupperna karakteriseras av noggrant arbetsutförande, frånluftsventilation, vattenradiatorer samt frånluftsvärmepump för värmesystem och varmvatten.

Denna energinivå sammanfaller i stort sett med de energisnålaste provhus som har byggts t ex i NUTEKs småhustävling, som har målsättningen 80 kWh/m² år. Flera av husen i denna tävling har emellertid inte nått energimålet på grund av att de har golvvärme.

Ju energisnålare byggnaden i sig är desto större relativ betydelse har gratisvärmets. Svårigheter att hålla en jämn innetemperatur ökar därmed, liksom risken för övertemperaturer. I täta och välisolerade småhus föreligger därför ett större behov av att kunna variera luft- och värmeförseln i och mellan olika rum. Slutsatsen av detta är bl a att reglerutrustningen och värmesystemet i energisnåla byggnader måste reagera snabbare och ha liten värmekapacitet. I första hand bör man därför satsa på enkel ventilation (frånluft) och ett enkelt värmesystem (radiatorer). Man bör undvika energislösande golvvärme och hälsofarlig luftvärme.

6.2 Energibalansbegreppet

Energi erfordras till värmesystemet, varmvatten och hushållsel. Skillnader i klimat mellan ute och inne, gratisvärme och energi till värmesystemet ger upphov till värmeströmmar genom klimatskärmen, inre byggnadsdelar och inredning samt som ventilationsförluster genom byggnadens otätheter, oavsiktlig ventilation, och som styrd ventilation genom kanalsystemet, avsiktlig ventilation. En byggnads energibalans definieras av sambandet

$$\text{Tillförd energi} + \text{Uttagen energi från värmelager} = \\ \text{Avgiven energi} + \text{Lagrad energi till värmelager}$$

Beaktad över en längre tidsperiod kan termerna beträffande värmelager försummas. Energibalanser upprättas huvudsakligen för medelförhållanden under olika tidsintervall, men används även för problem förknippade med byggnadens värmekapacitet och sk passivt solvärmeutnyttjande. Därvid måste man i ökad utsträckning beakta inverkan av faktorer och delposters variationer och beroenden samt tids- och slumpmässiga samspel.

Energi- och effektbalans

Energi tillförs byggnaden för:

Byggnadsuppvärmning

- Gratisvärme från sol, personer, vv, hushållsel
- Värmesystemet

Varmvatten

Hushållsel

Energi avges från byggnaden som:

Transmission via värmeavgivande omslutningsytor

Ventilation

- Otätheter t ex genom dragiga fönster
- Kanalsystem
- Vädring

Spillvärme

- varmvatten
- hushållsel

Värmeförluster kan uppdelas i:

Momentana

- ventilation
- transmission glasytor

Tidsfördröjda

- transmission tak, väggar och golv
- värmelagring i stomme och inredning

Värmetillförseln kan vara:

Momentan

- transmission glasytor
- ventilation
- elradiatorer

Tidsfördröjd

- t ex golvvärme ingjuten i betongplatta

Energieffektivt och komfortabelt system byggnad - installationer - brukare

Beskrivning av olika förlust- och tillskottsposter i effekt- och energibalansen.

Uteklimatet och dess variationer

sol

temperatur

Värmekapacitetens betydelse vid olika:

- gratisvärme
- innetemperaturkrav
- periodiska sänkningar
- klimatvariationer inne och ute
- avsvalningsförlopp

Isolering, värmelagring via begränsningsytor och i luften, förflyttning av energi från sol till skuggsida i byggnaden

Värmekapacitet hos

- inneluften
- inredning och möbler
- glasytor
- värmesystem

Golvvärme: konstruktion, ytmaterial, värmeisolering, reglersystem, injustering

Boendevanor

Arbetsutförandeskillnader

Värmekapacitetens betydelse på effekt- och energiförbrukning vid konstant innetemperatur

Gratisvärmets W/m^2 (storleksordning)

- bostäder
- industrier
- kontor

Golvvärme passar bäst med tunga stommar

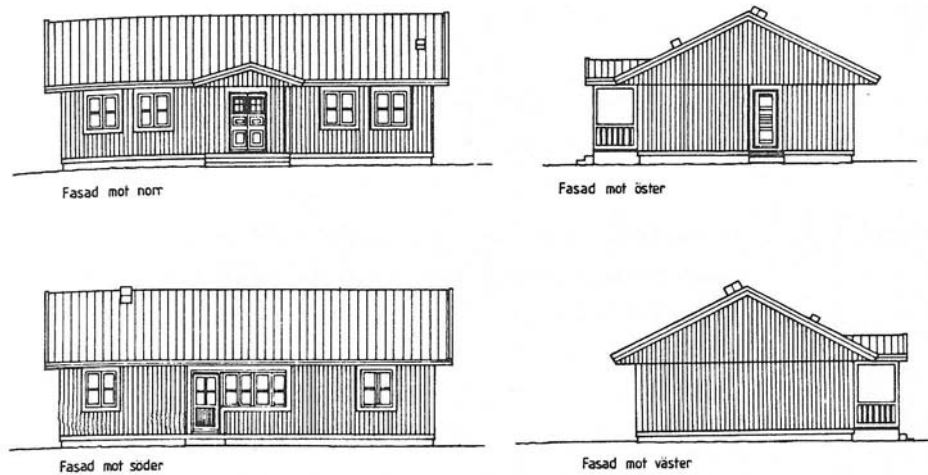
6.3 Praktikfall. Äldre respektive nytt småhus

I det följande presenteras ett förenklat förfarande för att belysa värmekapacitetens inverkan på effekt- och energiuttaget. Utgångspunkt är det av Harrysson (1988) redovisade beräkningsexemplet för ett vanligt förekommande småhus. Energibalansen har upprättats med antaganden bl a om att stationära förhållanden råder för tidsperioden månad och att värmekapaciteten försummas. Med förfarandet inklusive "tilläggstermer" enligt föreslagen beräkningsmetodik, kapitel 6, kan värmekapacitetens inverkan bedömas.

Beräkningar har gjorts för värmeteknisk standard på tre olika nivåer (dagens, SBN67 och äldre hus från början på 1900-talet) för att belysa olika relationer mellan tillskotts- och förlustposter i balansen såsom gratisvärme, transmissions- och ventilationsförluster samt värmekapacitet. Därvid belyses också olika relationer mellan direkta samt dämpade och tidsförskjutna delposter. Det är i sammanhanget även intressant att fokusera på skillnader mellan golvvärme och radiatorer.

Byggnadens geometriska och värmetekniska egenskaper

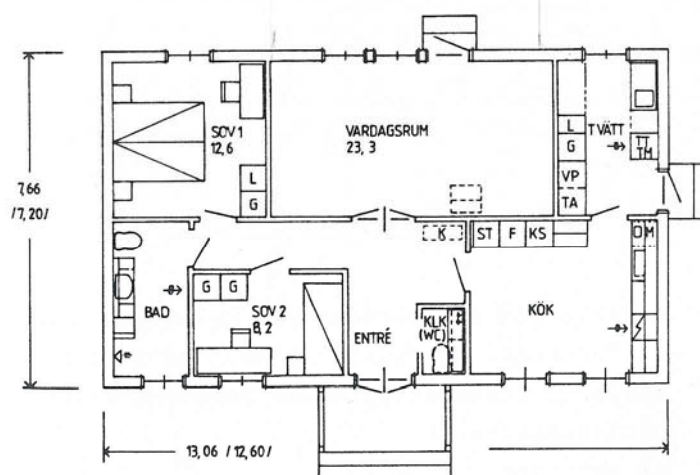
Det studerade småhuset är ett enplanshus med 91 m^2 primär bruksarea. Planer och fasader visas i figurerna 6.1 och 6.2. Utgångspunkten är en värmeteknisk nivå för klimatskärmen motsvarande kraven enligt BBR99, tabell 6.1. Beräkningarna omfattar stomkonstruktioner med mineralull (M), lättbetong (L) och betong (B). Samtliga studerade konstruktioner har i stort sett samma U-värde, ca $0,18 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. I syfte att förenkla beräkningarna och åstadkomma en konstruktion med extremt liten värmelagring har eventuella träreglars inverkan försumrats för stomkonstruktion M. Tabell 6.1 innehåller en sammanställning av ytor och värmegenomgångskoefficienter (U-värden) för olika byggnadsdelar och stomkonstruktioner i klimatskärmen.



Figur 6.1 Fasader för byggnaden i beräkningsexemplen. Normal orientering i väderstreck anges, Harrysson (1988).

Innerväggarna har ytan $71,0 \text{ m}^2$ på vardera sidan. De har dock inte inkluderats i de här redovisade beräkningarna. Inredningens och möblernas värmekapacitet har inte beaktats i något beräkningsfall. Huset har mekaniskt frånluftssystem med en avsiktlig ventilation motsvarande ventilationsfaktorn $P'_{\text{vent}} = 36,0 \text{ W}/^\circ\text{C}$. Den oavsiktliga ventilationen försummas.

Glasytan antas utgöra 70 % av fönsterytan. Fönster- och glasytor uppgår på långfasaderna till $5,3$ respektive $3,7 \text{ m}^2$ och $7,6$ respektive $5,1 \text{ m}^2$. Fönsterkarmarnas inverkan försummas. Byggnaden har utmed fasaderna horisontellt mätt 1 m stort taksprång, fönsterhöjden $1,2 \text{ m}$ samt avståndet $0,3 \text{ m}$ mellan karmens översida och takfotens undersida, figur 6.1. Vid gavlarna har ej någon takfot medtagits i beräkningarna.



Figur 6.2 Plan för den i beräkningsexemplen studerade byggnaden. Innerväggar, inredning och möbler har ej medtagits i beräkningarna, Harrysson (1988).

Transmissions- och ventilationseffektbehovet har bestämts för klimatskärmen och tre olika stomkonstruktioner M, L och B. Uppgifter om ytor och värmeledningkoefficienter (U-värden) ges i tabell 6.1. Huset har den värmekniska standard som är vanlig i dagens nyproduktion dvs U-värden kring $0,2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ för tak, väggar och golv samt treglasfönster. Beräkningar har även gjorts för huset med värmeknisk standard ungefär som i SBN 67, dvs med U-värden kring $0,6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ för tak, väggar och golv samt 2-glasfönster. Slutligen har beräkningar utförts för äldre hus med U-värden kring $1,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ för tak, väggar och golv samt 2-glasfönster (U-värde glas $3,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabell 6.1 Sammanställning av ytor och U-värden för olika byggnadsdelar och stomkonstruktioner i klimatskärmen samt uppgift om avgiven effekt genom transmission och ventilation.

Värmekniska prestanda för nivå

a. BBR99

b. SBN67

c. Äldre småhus (ca 1900-1930)

a.

		Stomkonstruktion					
Bygg- del	Yta m ²	M		L		B	
		U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C	U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C	U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C
Tak	91,0	0,184	16,7	0,190	17,3	0,185	16,8
Vägg	86,2	0,184	15,9	0,190	16,4	0,185	15,9
Golv	91,0	0,184	16,7	0,190	17,3	0,185	16,8
Glas- yta	8,8	2,000	17,6	2,000	17,6	2,000	17,6
P' _{tr}			66,9		68,6		67,1
P' _F			17,6				
P' _{vent} = 36,0 W/°C							

b.

		Stomkonstruktion					
Bygg- del	Yta m ²	M, L, B		L		B	
		U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C	U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C	U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C

Tak	91,0	0,6	54,6
Vägg	86,2	0,6	51,7
Golv	91,0	0,6	54,6
Glas- yta	8,8	3,0	26,4
P'_{tr}			187,3
<hr/>			
P'_F			26,4
<hr/>			
P'_{vent}			36,0
<hr/>			

c.

Stomkonstruktion							
Bygg- del	Yta Y m ²	M, L, B		L		B	
		U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C	U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C	U-värde W/m ² °C	U·Y W/°C
Tak	91,0	1,0	91,0				
Vägg	86,2	1,0	86,2				
Golv	91,0	1,0	91,0				
Glas- yta	8,8	3,0	26,4				
P'_{tr}			294,6				
<hr/>							
P'_F			26,4				
<hr/>							
P'_{vent}			36,0				
<hr/>							

Av tabell 6.2 framgår bl a att

- de direkta förlust- och tillskottsposterna relativt sett är större ju energisnålare (nyare) huset är (1,09 mot 0,17). För att åstadkomma ett så jämnt inneklimat som möjligt erfordrar nya hus konstruktioner med högre värmekapacitet och mer snabbreglerat värmesystem än äldre.

Tabell 6.2 Sammanställning av förlustfaktorer i ovanstående tabell 6.1 a - c.

Epok	Förlustfaktor W/°C						Balans- temp + golv
	P' _{tr} a)	P' _{vent}	P' _{tr} b)	P' _F	(P' _F + P' _{vent})	(P' _F + P' _{vent})/ tak + väggar	
BBR99	66,9	36,0 (18,0)	49,3	17,6	53,6	1,09	14,2 (11,8)
SBN67	187,3	36,0 (18,0)	160,9	26,4	62,4 (44,4)	0,39 (0,28)	16,9 (16,6)
Början 1900-talet	294,6	36,0 (18,0)	268,2	26,4	62,4 (44,4)	0,23 (0,17)	18,2 (17,8)

Anm.

Värden inom parentes avser halv normenlig ventilation (0,25 oms/h).

Gratisvärmets har antagits till 700 W.

Innetemperaturen har satts till 20 grader.

a) tak, väggar, golv och fönster

b) tak, väggar och golv; tidsfördröjda och dämpade delposter

Några överslagsuppgifter för värmekapacitet från Harrysson (1981, 1985)

- stommens totala värmekapacitet 6,8 kWh/°C (1½-planhus med träregelstomme och kryprumsbjälklag, 160 m² bostadsyta)
- inneluft $0,5 \cdot 0,33 \cdot 91 \cdot 2,4 = 36$ W/°C
- inredning - möbler 2 kWh/°C under 12 timmar, lagringsfaktor 260 W/°C
- glasrutor $c = 800$ Ws/kg K
- värmesystemet (lågtemperatur 55/45 vattenradiatorsystem ca 100 liter vatten) 0,12 kWh/°C vattentemperaturändring
- utetemperaturens dygnsvariation är normalt $\pm 4 - 6$ °C
- gratisvärme och internlasters medelvärde 700 W (variation?)

6.4 Andras beräkningsresultat

Södergren m fl (1985) har med datorprogrammet BRIS genomfört beräkningar av årsenergianvändningen för en enplansbyggnad med innermått 10 x 10 m och värmeteknisk standard enligt SBN 1980. Stockholm har valts som geografiskt läge och klimatåret 1971 har använts. Hänsyn har inte tagits till innerväggar eller möblering. Innetemperaturen har tillåtits variera mellan 18 och 25 °C. Upp till 18 °C tillförs värme via värmesystemet. Över 25 °C förutsätts vädring ske så att inte denna temperaturnivå överskrids. Beräkningar har gjorts med gratisvärme 0, 22 och 66 W/m².

Av resultaten framgår att årsenergianvändningen för det tunga huset jämfört med det lätta är 2, 9 respektive 41 % lägre. Värmekapacitetens inverkan på årsenergianvändningen är

försumbar vid gratisvärme mindre än ca 20 W/m^2 . Detta är ca 4 gånger högre värde än vad som är normalt i bostäder, ca 5 W/m^2 . Den innetemperaturvariation som antagits i beräkningarna, $18 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ är att betrakta som för höga i lokaler som arbetsplatser. Ett minskat temperaturintervall minskar självfallet skillnaden i energianvändningen mellan hus med tung respektive lätt stomme.

Värmeövergångsmotståndet mellan rumsluften och stomkonstruktionen minskar möjligheten att lagra energi i stommen. Användningen av stommens värmekapacitet får mindre betydelse för energianvändningen då stommen kläs in med något ytskikt eftersom värmeövergångsmotståndet då ökar, varvid den tunga och lätta konstruktionens egenskaper blir allt mer lika. Beräkningsexemplen i bilaga 1 ger kvantitativa uppgifter om detta.

7. BERÄKNINGSMETODER

7.1 Introduktion

Småhusets effekt- och energibalans kan förenklat beskrivas med uttrycket:

$$\text{Transmissionförluster} + \text{Ventilationsförluster} + \text{Lagrad energi} = \text{Gratisvärme} + \text{Tillförd energi via värmesystemet}$$

Betraktar man längre tidsperioder t ex månad kan lagringstermen försummas. Under kortare perioder exempelvis dygn, kan värmelagringsegenskaperna ha stor betydelse exempelvis p g a uteluftstemperaturvariationer, solstrålning samt vid periodiska temperatursänkningar inne. Värmekapacitetens inverkan på årsenergianvändningen kan, beroende på förutsättningarna t ex för innetemperaturen, vara marginell.

Analys av värmekapacitetens inverkan är i första hand förknippade med bestämning av effektuttaget, behovet av inköpt energi och/eller klassificering av det termiska inneklimatet. Centralt i sammanhanget är därför att upprätta effekt- och energibalansen med relevanta beräkningsmetoder. Studier begränsade till att enbart omfatta enskilda byggnadsdelar är i sammanhanget av mindre intresse men kan ändå bidra med värdefull information exempelvis vid parameterstudier.

7.2 Stationära eller instationära förhållanden

Konstaterade problem i byggda och bebodda hus, t ex i form av stora avvikelser mellan beräknade och uppmätta energivärden respektive hög energianvändning för vanliga konstruktioner, måste framgent angripas med ökad helhetssyn. Med hänsyn till ämnets komplexitet beskrivs nedan principiellt olika sätt att genomföra analysen. Tidigare bestämdes effektuttaget och energianvändningen för småhuset enligt graddagsmetoden, varvid bränslebehov, eldningssäsongens längd, dimensionerande effektbehov m m kunde beräknas. Utveckling av noggrannare metoder baserade på stapeldiagram eller varaktighetsdiagram skedde i början på 1970-talet. Stapeldiagrammetoder utgår från att medelförhållanden antas råda under den studerade tidsperioden, vanligtvis månad.

Det är i flera fall intressant att upprätta energibalanser för kortare tidsperioder än månad, t ex under vissa övergångstider höst och vår, för extrema köldperioder och vid temperatursänkning dag- och/eller nattetid. För sådana kortare tidsperioder och tidsmässiga temperaturvariationer har värmekapaciteten inverkan på effekt- och energianvändningen, vilket svårligen kan beaktas med traditionella, enkla beräkningsmetoder.

För att lösa instationära värmeströmningsproblem kan numeriska metoder användas t ex differensmetoden eller finita elementmetoden. Dyliga metoder når snabbt sin praktiska gräns med avseende på överblickbarhet och brukbarhet vid enkla kalkylförfaranden. Nämda metoder leder dessutom till betydande beräkningsarbeten för modellering av aktuell byggnad och övriga indata samt ibland till tolkningssvårigheter av beräknade värden. Aktuella datorprogram är oftast utformade för forskningsändamål och med manualer som är summariskt uppbyggda för specialister. Allt detta försvårar lösningen av instationära värmeströmningsproblem.

Analytiska förfaranden baserade på att periodiska förhållanden antas råda har studerats av ett antal forskare. Många av dessa arbeten har begränsats till studier av enskilda byggnadsdelars värmetekniska egenskaper, dvs delsystem av energibalansen. Exempelvis är en yttervägg eller ett tak blott två av många delsystem som påverkar rumstemperaturen. Analytiska beräkningsmetoder ger om de utformas med sikte på praktisk användning möjlighet att bedöma olika faktorerers inverkan på temperaturer samt effekt- och energianvändning.

Emellertid kräver analytiska beräkningsmetoder approximationer och förenklingar i större utsträckning än de tidigare nämnda numeriska metoderna. En stor del av arbetet med att utarbeta analytiska metoder består därför just i valet av förenklingar. Analytiska förfaranden som baseras på periodiska förhållanden utgör principiellt inte någon betydande begränsning av vilka problemtyper som kan behandlas, då dylika förfarandens användningsområden senare genom lämpligt matematiskt angreppssätt, t ex fourieranalys, kan utvidgas till att omfatta åtskilliga problemtyper inkluderande insvängningsförlopp respektive godtyckliga tidsvariationer.

7.3 Överslagsmetoder kontra avancerade datorprogram

Med beräkningar baserade på ett deterministiskt synsätt (delposter med exakta numeriska värden) samt avancerade numeriska metoder och datorprogram, som relativt noggrant kan modellera inverkan av faktorer, når man trots betydande arbetsinsatser sannolikt inte bättre överensstämmelse än $\pm 10\%$ mellan beräknad och uppmätt energianvändning. Svårigheter föreligger att steg för steg följa beräkningarna och bedöma olika faktorerers inverkan på det fysikaliska förloppet. Ett stort antal beräkningsfall måste dessutom genomföras för att resultaten skall innefatta normala variationer hos inverkan av faktorer och kombinationer av dessa. Detta är ur tillförlitlighetssynpunkt för resultatens användbarhet mindre lämpligt då skillnaden i t ex energianvändning mellan två beräkningsfall eller konstruktionsalternativ kan vara av samma storleksordning, som uppges för skillnaden i energianvändning mellan byggnader med olika teknisk lösning t ex radiatorer och golvvärme respektive mellan olika golvvärmekonstruktioner.

En annan möjlighet och mer intressant metodik för beräkningssimuleringar av mångfaktoriella problem, som byggnaders energianvändning, är därför överslagsmetoder, Harrysson (1988). Denna uppläggningsmetod möjliggör ökad förståelse för problemet och parameterstudier av olika delsystem exempelvis för bestämning av värmeförlusterna genom enskilda byggnadsdelar respektive betydelsen av olika golvvärmekonstruktioners värmekapacitet.

7.4 Föreslagen beräkningsmetodik

Ett praktiskt angreppssätt måste väljas för att analysera värmekapacitetens inverkan på ett mer pedagogiskt tilltalande sätt. Det föreslagna angreppssättet består i att genomföra överslagsberäkningar baserade på ett statistiskt synsätt och parameterstudier av ingående delsystem för att öka kunskaperna om delarna som byggnad och installationer, t ex golvvärmsystemet. Därigenom kan bättre underlag skapas för bedömning av helheten, dvs småhusets effekt- och energibalans med beaktande av olika tekniska lösningars egenskaper.

Analysen görs i två steg:

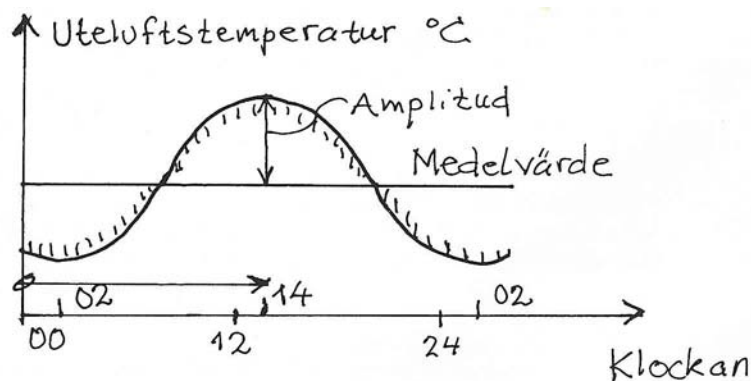
- Stationära värmeflöden beräknas dels för tillskotts- och förlustposter för olika konstruktioner, klimatsituationer inne - ute m m. Värmekapacitetens inverkan på det fysikaliska förloppet studeras genom överslagsberäkningar och parameterstudier av ingående delar som byggnad och installationer. Med ökade kunskaper och säkrare underlag om de olika delarnas egenskaper kan en bättre helhetsbedömning göras med större förståelse.
- Effekt- och energibalansen upprättas för huset. Beräkningarna uppdelas i en stationär och en instationär del. Värmelagringens inverkan på det instationära förloppet analyseras med hjälp av TS-metoden, som utvecklats av Harrysson (1988). T står för tidsmässiga variationer och S för slumpmässiga (eller statistiska). Metoden har för tidsmässiga variationer uttestats mot DEROB, som är ett avancerat datorprogram. Överensstämmelsen har befunnits vara god vid dygnsvariationsproblem av det här aktuella slaget.

Med den valda uppläggningsen kan uppgifter enkelt framtas om total respektive aktiv (medverkande) värmekapacitet vid periodiska svängningar.

Modellering enligt TS-metoden och tidsmässiga variationer

Varje delpost i effekt- och energibalansen kan exakt beskrivas genom fourieranalys med en konstant term och ett oändligt antal cosinustermer. För dygnsvariationsförlopp kan man som tidigare nämnts med god noggrannhet beskriva delposterna med en konstant term och en cosinusterm med fasförskjutning (= tidpunkt då högsta värdet uppträder). Analysen sker i två steg:

- stationär del (aritmetisk summering av delposterna)
- instationär del (vektoriell summering av delposterna, jämför principen för kraftpolygon)



Figur 7.1 Principen för modellering enligt TS-metoden exemplifieras för uteluftstemperaturens dygnsvariation, Harrysson (1988).

Beräkningsexempel

Exemplet har inriktats på att närmare utreda värmekapacitetens inverkan på effekt- och energiuttaget i småhus med olika stomsystem. Med hjälp av den föreslagna metodiken analyseras nedan några viktiga iakttagelser som gjorts i hus med golvvärme jämfört med radiatorvärmada:

Årsenergibehov/energibehov kortare perioder
Effektuttag (momentant) Dimensionerande effektuttag.

Förenklingsbegrepp/-förfaranden

Total värmekapacitet,

Begreppet aktiv (medverkande) värmekapacitet m m

- ett materialskikt, flera, färdig konstruktion, hela huset + brukare

Dynamiskt U-värde/k-värde, dvs genomgångsfaktorn J. Lagringsfaktorn L. Normala andelar/värden.

Relation transmission och ventilation, Förluster relativt tillskott

Det går inte nå bättre överensstämmelse än $\pm 10\%$ i bebodda hus.

Problemet

Beräkningsnoggrannheten. Jämförelser mellan olika alternativ.

Skillnaden mellan två stora tal som kan vara mindre eller av samma storleksordning som beräkningsnoggrannheten resp variation pga skillnader i boendevanor och kvalitet i arbetsutförande

Stora datorprogram: indata - beräkning - utdata. Vad händer?

Analytiska (överslags-)metoder. Lämpliga för parameterstudier, delberäkningar, ökad förståelse. Fourieranalys. Ett antal sinustermer med fasförskjutning.

8. SAMMANFATTANDE SLUTSATSER

Framtidens byggande måste inriktas på miljöriktiga, enkla, billiga och lättskötta lösningar för att man med hög lönsamhet och tillförlitlighet skall uppnå god inomhusmiljö och effektiv energianvändning. Noggrant arbetsutförande, torrt och rent byggande under kontrollerade förhållanden samt installationer med rena och korta kanaler, speciellt för tilluft, är betydelsefulla faktorer i sammanhanget.

Bruksskedet är dominerande vad gäller energianvändning och miljöbelastning. Ju energisnålare huset i sig är desto mindre inverkar bruksstadiets energianvändning på energianvändningen under hela livslängden. Ju större innetemperaturvariationer som tillåts desto större inverkan har stommens värmekapacitet. Acceptabla temperaturnivåer och intervall måste därför närmare preciseras. Andra inverkanse parametrar på valet av lätt eller tung stomme är bl a gratisvärmets storlek relativt värmeförluster genom transmission och ventilation.

Extremt tröga värmesystem som vissa golvvärmekonstruktioner är mindre lämpliga för energieffektiva byggnader med litet effektbehov och i vilka den okontrollerbara andelen gratisvärmestillskott från processer, personer och solinstrålning relativt sett kan ge ett mycket stort bidrag till byggnadens uppvärmningsbehov. Hur stor del av dessa tillskott som kan tillgodogöras beror i hög grad på värmekapaciteten, reglersystemets noggrannhet och hur snabbt värmesystemet kan anpassa sig till det aktuella behovet. Relativt sett större gratisvärmeandelar i allt energisnålare byggnader medför de blir mer känsliga för människans beteende. Problemen förstärks naturligtvis av trenden mot allt större fönsterytor.

Om man skall kunna hålla jämn innetemperatur och dra maximal nytta av gratisvärmets i energieffektiva byggnader måste ha ett följsamt värmesystem. Värmesystemet skall vara placerat inomhus för att ha hög energieffektivitet.

Ju energisnålare huset i sig är desto mindre värmetröghet måste värmesystemet ha. Detta för att värmestillskottet skall kunna styras så noggrant och snabbt som möjligt. Golvvärme i energisnåla byggnader passar bäst i kombination med tung stomme (= hög värmekapacitet) Undersökningar visar att radiatorer med termostater ger den jämnaste innetemperaturen. Golvvärme i byggnader med liten värmekapacitet måste utformas så energieffektiv och komfortabel som möjligt dvs med så liten värmekapacitet som möjligt samt vara försedd med noggrann rumsreglering. Ju större innetemperaturvariation som kan accepteras och ju mer gratisvärme som förekommer desto mer intressant är det med tung stomkonstruktion dvs med hög värmekapacitet.

9. FÖRSLAG TILL FRAMTIDA FoU-SATSNINGAR

Baserat på den genomförda förstudien ges i det följande förslag till ett antal angelägna FoU-satsningar.

Praktisk vägledning

Utveckla den praktiska vägledningen i form av frågor/svar med fler relevanta frågor för projektörer och marknadsförare. Det är viktigt att knyta an till och strukturera pågående debatt och aktiviteter. Byggnader för olika ändamål än bostäder analyseras. Resultaten redovisas i en teknisk broschyr avsedd för projektörer och marknadsförare.

Projekteringshjälpmedel

En överslagsmetod för bedömning av värmekapacitetens inverkan utvecklas och uttestas. Projekteringshjälpmedel för vanliga konstruktioner tas fram t ex i form av diagram och tabeller med uppgifter om överslagsvärden för värmekapacitetens betydelse i olika sammanhang. Parameterstudier genomförs för olika material, konstruktioner, byggnadsdelar och hela byggnader.

Utredning görs om enkla begrepp som används i samband med stationära värmeströmningsproblem efter modifiering kan användas för att beakta värmekapacitetens inverkan genom begrepp som total värmekapacitet, avsvlnings- och uppvärmningsförlopp, aktiv värmekapacitet m m.

Undersökning görs om hur nya parametrar kan användas baserat på modifiering av vedertagna, t ex dynamiskt U-värde utgående från värmegenomgångskoefficient (U-värde) , lagringsfaktor L baserad på aktiv värmekapacitet) relaterad till total värmekapacitet samt godtyckliga förlopp beskrivna genom fourieranalys och periodiska förlopp.

Beräkningsmetoder

Principiell beskrivning, analys och uttestning av olika beräkningsmetoder från enkla överslagsmetoder till allt mer komplicerade. Beräkningsjämförelser med ett antal konkreta exempel. Olika metoders felkällor och noggrannhet. Godtyckliga förlopp, periodiska svängningar samt rena avsvlnings- och uppvärmningsförlopp studeras.

I litteraturen redovisade beräkningsexempel sammanställs och analyseras. Vid behov genomförs nya.

Tekniska lösningar

Värdera befintliga lösningar och utveckla nya med syfte att öka värmekapacitetsutnyttjandet. Såväl passiva som aktiva lösningar studeras t ex hålbjälklag och golvvärme.

Byggnaders värmekapacitet samt utformning av olika glas- och -byggnadskonstruktioner. Jämförelser mellan olika lösningars effekt- och energiuttag samt inverkan på det termiska inneklimat. Speciellt studeras kyl- och värmebehoven.

Byggregler och värmekapacitet

Svenska byggregler i internationell jämförelse med hänsyn till värmekapacitetens inverkan.

Experimentella undersökningar

Jämförelser mellan uppmätta och beräknade värden enligt olika metoder och experimentella undersökningar.

Innetemperatur - nivå, variationer och komfort

Kartläggning av innetemperaturens nivå, variationer och komfort. Olika människors komforttemperatur och toleranser. Litteraturinventering och enkätundersökning.

Värmeövergångsmotståndens inverkan på byggnadens aktiva värmekapacitet

Olika stomkonstruktioners aktiva värmekapacitet analyseras vid olika värmeövergångsmotstånd mellan rumsluft och stommen p g a ytskikt.

Slutord

Åtskilliga undersökningar har genomförts inom värmekapacitetsområdet. Resultaten har hittills sällan blivit av större praktisk betydelse bl a beroende på undersökningarnas uppläggning och genomförande. Kunskapsmässigt är ämnesområdet mycket komplext och den teoretiska nivån hög. En viktig förutsättning för att nå ökad framgång i framtida satsningar är att man till olika projekt knyter personer med såväl betydande teoretisk kunskap som omfattande praktiska erfarenheter.

Undersökningar av värmekapacitetens inverkan i byggnadssammanhang är ofta teoretiskt och pedagogiskt komplicerade problem. Många faktorer inverkar och förutsättningarna skiftar kraftigt, vilket försvårar resultatanalysen. Ofta handlar det om att beräkna en skillnad mellan två alternativ t ex i årsenergianvändning. En skillnad som kan vara mindre än beräkningsnoggrannheten.

Av nämnda skäl och för att underlätta förståelsen vid lösandet av värmekapacitetsproblem föreligger ett stort behov av att utveckla och uttesta en enkel förklaringsmodell/beräkningsmetod. Därvid är det i sammanhanget viktigt att vid behov kunna beakta ingående delposters tids- och slumpmässiga variationer, dämpning, tidsfördröjning, värmekapacitet m m. En framkomlig väg kan inledningsvis vara att utgå från olika begrepp som används vid stationära förhållanden och vedertagna begrepp och successivt modifieras/utvidgas dessa. Exempel på detta kan vara att använda genomgångsfaktorn J , dynamiska U -värdet som komplement till värmegenomgångskoefficienten (U -värdet) samt lagringsfaktorn L (aktiva värmekapaciteten vid periodiska svängningar) som komplement till den totala värmekapacitet.

Analyser med hjälp av den skisserade enkla förklaringsmodellen/beräkningsmetoden utgår från stationära förhållanden samt utvidgas beroende på problemtyp och noggrannhet successivt enligt:

1. Utgå från stationära förhållanden
2. Upprätta och lös den stationära energibalansen för tidsperioden
3. Lös effektbalansen (fourieranalys, vektoriell addition av ingående delposter med hänsyn till tidsfördröjning och dämpning)
4. Därefter och vid behov används omfattande instationära beräkningsmetoder med datorstöd

Redovisningen utformas på ett för marknadsföraren och projektören pedagogiskt tilltalande sätt t ex baserat på diagramframställning eller tabellverk.

10. REFERENSER

Adamson, B & Gaffner, D (1981). Lätt eller tung byggnadskonstruktion. Värmekapacitetens inverkan på rumstemperaturen och årsenergibehovet. Föredrag på VVS-tekniska föreningen, 1 april 1981, Stockholm.

Akander, J (2002). The Effektive Heat Capacity of Three Wood Constructions. Theoretical and Experimental Assessments. KTH, Divisions of Building Materials and Building Technology, TRITA-BYMA 2002:1, Stockholm.

Bejrums, H & Grennberg, T (2003). En väg till fungerande hus. Funktionsentreprenader, livscykelekonomi och BOT. KTH, Institutionen för fastighetsekonomi, Rapport nr 19 KTHs Bostadsprojekt, Stockholm.

Boverket (1994). Boverkets byggregler 94. Föreskrifter och allmänna råd BFS 1993:57. Boverket, Publikationsservice, Karlskrona.

Boverket (1999). Boverkets byggregler 99. BFS 1993:57 med ändringar t o m BFS 1998:38. Boverket, Publikationsservice, Karlskrona.

Börresen, B (1972). Varmelagring i bygningskonstruksjoner. Norsk VVS nr 3, 1972, Oslo.

Börresen, B (1974a). Forenkling av varmelagringsproblemer. Norsk VVS nr 6, 1974, Oslo.

Börresen, B (1974b). Dynamisk varmeström i rom. Norsk VVS nr 8, 1974, Oslo.

Carslaw, H S & Jaeger, J C (1959). Conduction of heat in solids. Clarendon Press. Second ed., Oxford.

Energimyndigheten (1999). 8000 kWh per år är ingen utopi. Eskilstuna.

Granholt, H (1971a). Om frostens nedträngande i marken med särskild hänsyn till möjligheten att förhindra tjälskador. CTH, Handlingar nr 332, Göteborg.

Granholt, H (1971b). Värmefflöde genom enkla och sammansatta väggar under inverkan av periodiskt variabel innetemperatur. CTH, Handlingar nr 333, Göteborg.

Gundersen, P (2001). Nyanser i golvvarmedebatten. Bygg & teknik 2/01, Stockholm.

Gustén, J & Harrysson, C (1980). Högtemperatursystem fungerar i praktiken som lågtemperatursystem. CTH, Avd för byggnadskonstruktion, Arbetsrapport 1980:9, Göteborg.

Harrysson, C (1981). Effektbehovsberäkning av byggnad och värmesystem. CTH, Avd för byggnadskonstruktion, Arbetsrapport 1981:3, Göteborg.

Harrysson, C (1981). Effekt- och energibehov vid periodvisa temperatursänkningar i småhus. Teoretisk beräkning av värmekapacitetens betydelse för vanligen förekommande konstruktioner och värmesystem. CTH, Avd för byggnadskonstruktion, Arbetsrapport 1981:20, Göteborg.

Harrysson, C (1983). Värmekapacitetens betydelse vid dimensionering av värmesystem och reglersystem. CTH, Avd för byggnadskonstruktion, Publ 1983:9, Göteborg.

Harrysson, C (1984). Värmekapacitetens betydelse för småhusets effekt- och energibehov. TräteknikCentrum, Rapport nr 21, Stockholm.

Harrysson, C (1985). Energibesparing vid temperatursänkning nattetid - Fältmätningar i småhus med trä- alternativt betongstomme. TräteknikCentrum, Rapport nr 78, Stockholm.

Harrysson, C (1987). Effektivare värmestyrning i direktelvärmda småhus. Sydkraft AB:s stiftelse för forskning, projekt nr 211, Malmö.

Harrysson, C (1988). Småhusets energiomsättning. Analys med särskild hänsyn till inverkande delposters variationer. CTH, Avd för byggnadskonstruktion, Publ 88:2, Göteborg. (Doktorsavhandling).

Harrysson, C (1989). Effekt- och energiuttag vid lätt eller tung stomkonstruktion. Problemanalys. Beräkningsexempel med överslagsmetod. Bygg-och Energiteknik AB, Falkenberg. Uppdrag för SBUF, Stockholm. (Även publicerat som SBUF:s Informationsblad 90:19 "Lätt eller tung småhusstomme - effekt - och energiberäkning").

Harrysson, C (1992a). Högisolerade konstruktioner. En översyn av gällande beräkningsmetoder för lambda- och U-värden. Boverket, Publikationsservice, Karlskrona.

Harrysson, C (1992b). Miljöriktigt småhusbyggande. Arkitekt högskolen i Oslo.

Harrysson, C (1994a). Innemiljö och energianvändning i småhus med elvärme. Enkätundersökning och mätningar i 330 gruppbyggda småhus med olika systemlösningar. Boverket Publikationsservice, Rapport 1994:8, Karlskrona.

Harrysson, C (1994b). Innemiljö och energianvändning i småhus med elvärme. Några praktiska resultat. Elvärmegruppen, Rapport 5/1994, Stockholm.

Harrysson, C (1997). Golvvärme eller radiatorsystem i småhus? Värdering genom praktiska mätningar enligt förlustfaktormetoden, registrering av el-, gas- och vattenanvändning. Bygg- och Energiteknik AB, Falkenberg.

Harrysson, C (1999a). Stora möjligheter att spara energi och förbättra innemiljön i direktelvärmda småhus. Vägledning för effektivisering av elvärme i stället för omställning. Bygg- och Energiteknik AB, Falkenberg.

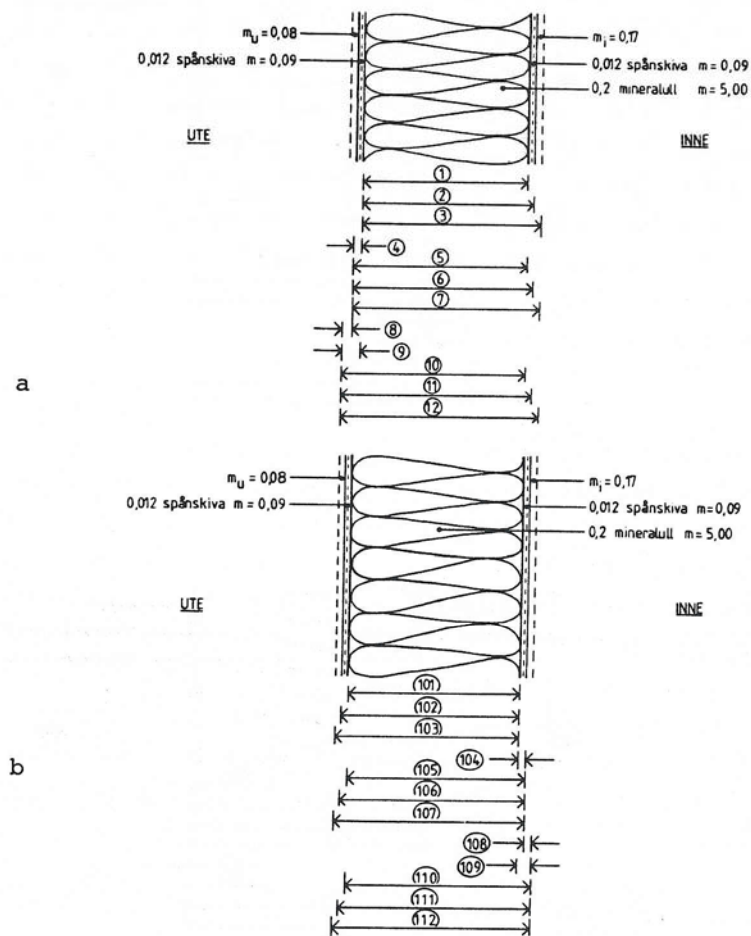
Harrysson, C (1999b). Erfarenheter av olika sätt att bygga: Innemiljö och energianvändning i småhus. Bygg & teknik 5/99, Stockholm.

Harrysson, C (2000). Energieffektiva golvvärmekonstruktioner kräver såväl minskad värmetröghet som ökad isolering. Bygg & teknik 4/00, Stockholm.

Harrysson, C (2003). Energieffektiv elvärme. Erfarenheter av olika tekniska lösningar i småhus. Fera, Stockholm.

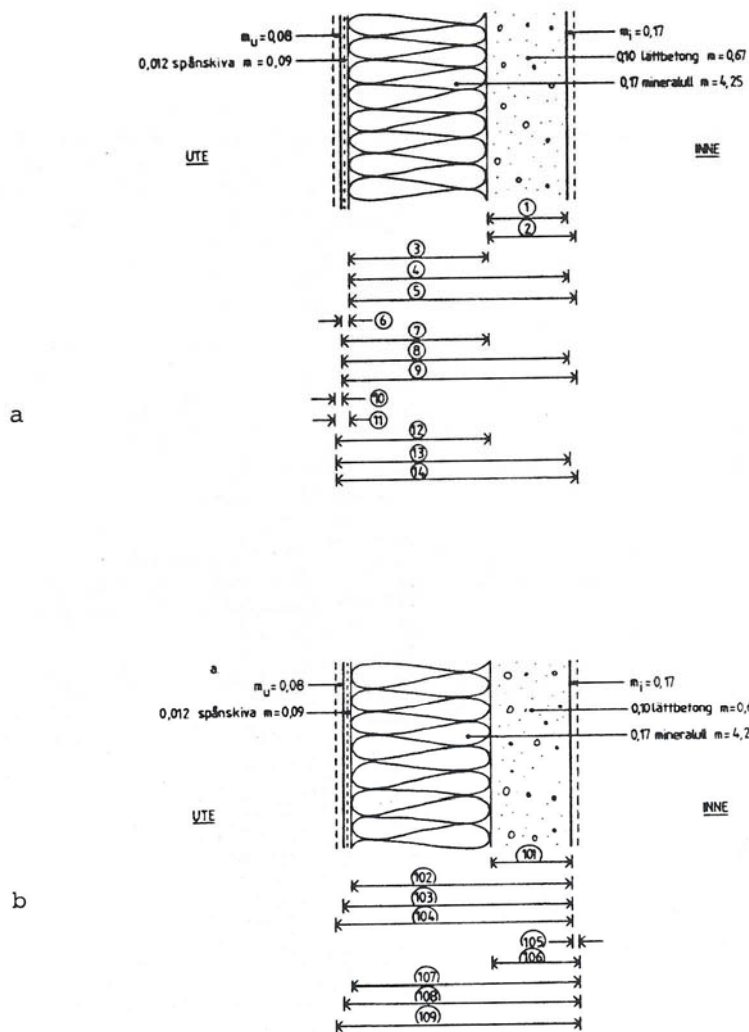
- Hector, C (1996). Värmeisolering och termiskt rumsklimat. En handbok till Boverkets byggregler. Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Jahnsson, S (1994). "Vart tog den lilla kilowatten vägen?". Konsumentverket, Rapport 1994/95:14 och Bilagedel till rapport 1994/95:14.
- Jahnsson, S (1997). 2000-talets småhus. Resultat av etapp 1. Granskning och utvärdering under vintern 96/97. Energimyndigheten, Eskilstuna.
- Jahnsson, S (1998). 2000-talets småhus. Resultat av etapp 2. Granskning och utvärdering under vintern 97/98. Energimyndigheten, Eskilstuna.
- Johannesson, G (1981). Active heat capacity. LTH, Institutionen för husbyggnadsteknik, Report TVBH-1003, Lund.
- Jonassen, N red (1970). Termisk og atmosfaerisk indeklima. Polyteknisk forlag, Köpenhamn.
- Larsson, T (1982). Jämförelser mellan uppmätt och beräknat rumstemperaturförlopp. CTH, Avd för installationsteknik, Rapport 1982:2, Göteborg.
- Magnusson, L & Qvist, L (1990). Inomhusklimat för människan. Liber förlag, Stockholm.
- Peterson, F (1980). Klimatberäkningar. Kompendium I : 2. KTH, Uppvärmnings- och ventilationsteknik, Faibo grafiska, Andra reviderade upplagan, Stockholm.
- Sandin, K (1990). Värme Luftströmning Fukt. Kompendium i byggnadsfysik. LTH, Avd för byggnadsfysik, Lund.
- Ståhl, F (2000). Inverkan av termisk massa på en byggnads energibehov under dess livscykel. System- och komponentanalys. CTH, Institutionen för byggnadsfysik, Publikation P-00:4, Göteborg.
- Södergren, D m fl (1985). Värmekapacitet i byggnadsstommar. Stommens tillgänglighet för energilagring. Statens råd för byggnadsforskning, Rapport R 76:1985, Stockholm.
- Valbjörn, O & Nielsen PA (1988). Inomhusklimat. SABO Utveckling, Rapport nr 9, Stockholm.

BILAGA 1. GENOMGÅNGS- OCH LAGRINGSFAKTORER FÖR NÅGRA KONSTRUKTIONER BERÄKNADE ENLIGT TS-METODEN, Harrysson (1988)

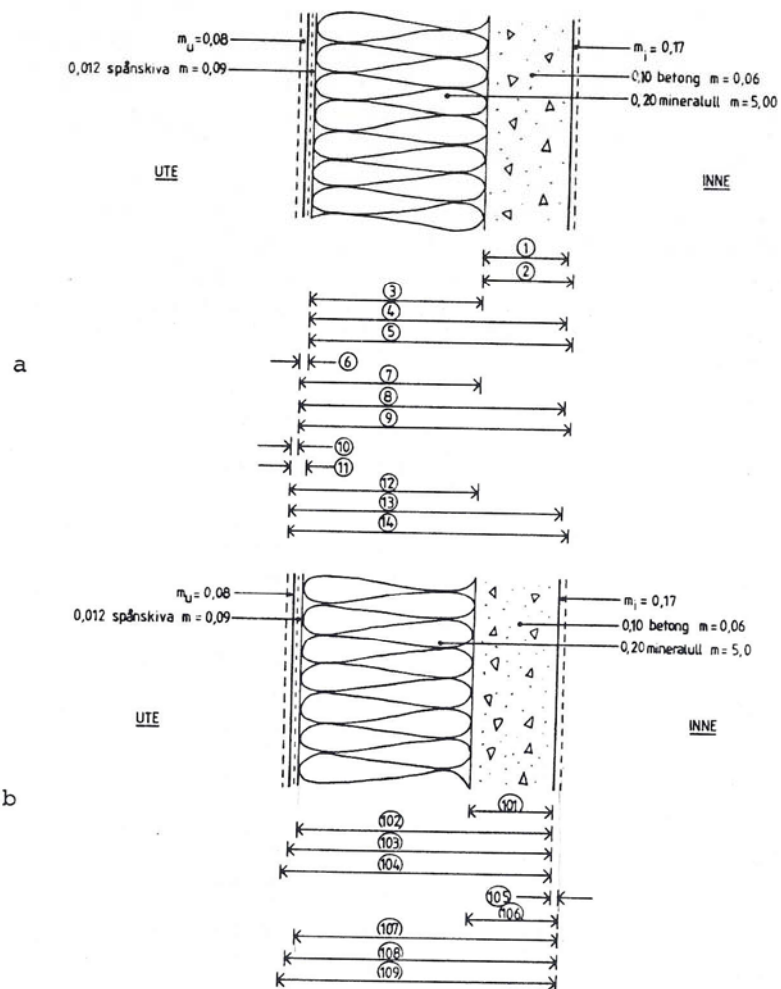


Figur b1.1 Mineralullskonstruktion, (M), med 0,2 m mineralull, $U = 0,184 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.
Värmemotstånd m har enheten $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Numrering av olika beräkningsfall vid temperaturpåverkan

a. ute
b. inne



Figur b1.2 Lättbetongkonstruktion, (L), med 0,1 m lättbetong, $U = 0,190 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.
 Värmemotstånd m har enheten $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Numrering av olika beräkningsfall
 vid temperaturpåverkan
 a. ute
 b. inne



Figur b1.3 Betongkonstruktion, (B), med 0,1 m betong, $U = 0,185 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.
 Värmemotstånd m har enheten $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Numrering av olika beräkningsfall
 vid temperaturpåverkan
 a. ute
 b. inne

Tabell b1.1 Mineralullskonstruktion, (M). Genomgångsfaktorns J absolutbelopp och fasförskjutning för olika beräkningsfall. Tjockleken hos mineralullsskiktet är 0,20 m. Fallen 1 - 12 avser temperaturpåverkan ute medan fallen 101 - 112 avser inne.

Beräkningsfall	k	J		φ_J
	$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	rad fördröjning
1	0,200	0,20	0,20	0,27
2			0,19	0,32
3			0,18	0,50
4			11,63	0,02
5			0,19	0,32
6			0,19	0,38
7			0,18	0,55
8			12,50	0
9			6,02	0,03
10			0,19	0,41
11			0,19	0,46
12	0,184	0,18	0,18	0,64
101	0,200	0,20	0,20	0,27
102			0,19	0,32
103	0,193	0,19	0,19	0,41
104			11,62	0,02
105			0,19	0,32
106			0,19	0,38
107	0,190	0,18	0,18	0,54
108			5,88	0
109			3,91	0,04
110			0,18	0,50
111			0,18	0,55
112	0,184	0,18	0,18	0,64

Tabell b1.2 Lättbetongkonstruktion, (L). Genomgångsfaktorns J absolutbelopp och fasförskjutning för olika beräkningsfall. Tjockleken hos mineralullsskiktet är 0,17 m. Fallen 1 - 14 avser temperaturpåverkan ute medan fallen 101 - 109 avser inne.

Beräkningsfall	k	J		φ_J
	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$	rad fördröjning
1	1,490	1,45	0,43	
2		1,11	0,59	
3		0,23	0,20	
4	0,196	0,14	1,23	
5		0,11	1,50	
6		11,63	0,02	
7		0,23	0,25	
8		0,14	1,28	
9		0,11	1,55	
10		12,50	0	
11		6,02	0,03	
12		0,22	0,33	
13		0,14	1,36	
14	0,190	0,10	1,64	
101	1,490	1,45	0,43	
102	0,196	0,14	1,23	
103		0,14	1,28	
104	0,196	0,14	1,36	
105		5,88	0	
106		1,11	0,59	
107		0,11	1,50	
108		0,11	1,55	
109	0,190	0,10	1,64	

Tabell b1.3 Betongkonstruktion, (B). Genomgångsfaktorns J absolutbelopp och fasförskjutning för olika beräkningsfall. Tjockleken hos mineralullsskiktet är 0,20 m. Fallen 1 - 14 avser temperaturpåverkan ute medan fallen 101 - 109 avser inne.

Beräkningsfall	k	J	φ_J
	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$	rad fördröjning
1	17,000	16,95	0,15
2		4,20	0,35
3		0,20	0,27
4	0,191	0,18	0,69
5		0,07	1,63
6		0,32	0,02
7		0,19	0,32
8		0,18	0,75
9		0,06	1,68
10		12,50	0
11		6,02	0,03
12		0,19	0,41
13		0,18	0,83
14	0,185	0,06	1,77
101	17,000	16,95	0,15
102	0,191	0,18	0,69
103		0,18	0,75
104	0,191	0,18	0,83
105		5,88	0
106		4,27	0,35
107		0,07	1,63
108		0,06	1,68
109	0,185	0,06	1,77

Tabell b1.4 Mineralullskonstruktion, (M). Lagringsfaktorns L absolutbelopp och fasförskjutning för olika beräkningsfall. Tjockleken hos mineralullsskiktet är 0,20 m. Fallen 1 - 12 avser temperaturpåverkan ute medan fallen 101 - 112 avser inne.

Beräknings- fall	$ L $ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$	φ_L rad framförhållning
1	0,24	0,47
2	0,24	0,48
3	0,23	0,50
4	11,63	0,02
5	1,12	1,35
6	1,12	1,35
7	1,12	1,36
8	12,50	0
9	6,03	0,01
10	1,09	1,26
11	1,09	1,27
12	1,10	1,27
101	0,24	0,47
102	0,24	0,48
103	0,24	0,49
104	11,64	0,02
105	1,11	1,35
106	1,12	1,35
107	1,12	1,36
108	5,88	0
109	3,91	0
110	1,05	1,17
111	1,06	1,18
112	1,06	1,17

Tabell b1.5 Lättbetongkonstruktion, (L). Lagringsfaktorns L absolutbelopp och fasförskjutning för olika beräkningsfall. Tjockleken hos mineralullsskiktet är 0,17 m. Fallen 1 - 14 avser temperaturpåverkan ute medan fallen 101 - 109 avser inne.

Beräknings- fall	$ L $	φ_L
	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$	rad framförhållning
1	2,12	0,63
2	2,15	0,76
3	0,26	0,36
4	0,26	0,44
5	0,26	0,45
6	11,64	0,02
7	1,10	1,32
8	1,12	1,33
9	1,12	1,33
10	12,50	0
11	6,03	0,01
12	1,08	1,24
13	1,09	1,25
14	1,10	1,24
101	2,12	0,63
102	2,66	0,92
103	2,67	0,92
104	2,67	0,92
105	5,88	0
106	1,62	0,47
107	2,01	0,65
108	2,01	0,65
109	2,01	0,64

Tabell b1.6 Betongkonstruktion, (B). Lagringsfaktorns L absolutbelopp och fasförskjutning för olika beräkningsfall. Tjockleken hos mineralullsskiktet är 0,20 m. Fallen 1 - 14 avser temperaturpåverkan ute medan fallen 101 - 109 avser inne.

Beräkningsfall	$ L $	φ_L
	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$	rad framförhållning
1	17,98	0,27
2	12,53	1,02
3	0,24	0,47
4	0,24	0,48
5	0,24	0,48
6	11,64	0,02
7	1,11	1,35
8	1,12	1,35
9	1,12	1,35
10	12,50	0
11	6,03	0,01
12	1,09	1,26
13	1,09	1,27
14	1,09	1,26
101	17,98	0,27
102	13,92	1,28
103	13,92	1,28
104	13,92	1,28
105	5,88	0
106	4,46	0,07
107	4,94	0,34
108	4,94	0,35
109	4,94	0,34