Möjligheter att minska energianvändningen i småhus

- en jämförande studie av värmelagring i olika stomsystem

LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Institution för bygg- och miljöteknologi/ Avdelningen för byggmaterial

Examensarbete:
Björn Hardenhill

© Copyright Björn Hardenhill

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2013

Sammanfattning

Utvecklingen av mer energieffektiva byggnader handlar idag till stor del om att använda mindre energi än gällande byggnormskrav. Ett sätt att bemöta de ständigt hårdare energikraven är att utnyttja byggnaders värmelagrande förmåga. För att kunna utnyttja en byggnads värmelagringsförmåga optimalt bör en tung stomme bestående av tegel, lättbetong, betong eller annat stenmaterial väljas, då dessa har bättre möjlighet att lagra och avge överskotts-värme än en lätt stomme.

Examensarbetet syftar till att undersöka hur värmelagring fungerar och vilka faktorer som ger den mest fördelaktiga inomhustemperaturen då värme-tillförseln upphör under en stor del av dygnet. Vinsten med tillfällig avstängning av värmen är ur ett samhällsperspektiv att energibolagens effekttoppar blir lägre. Dessutom skulle ett fördröjt effektuttag kunna tillvarata industrins överskottsvärme. Ur brukarperspektiv är vinsten minskad uppvärmning och eventuell möjlighet att köpa billigare energi.

Resultaten av de utförda simuleringarna visar att den mest effektiva åtgärden för att minska temperaturdifferensen är att minska värmeövergångsmotståndet, vilket också är den svåraste. Andra betydelsefulla åtgärder är att låta tak, grund samt inner- och ytterväggar vara av betong. I tillägg bör ytorna vara släta och välexponerade samt delarna hopsatta så att byggnaden blir så tät som möjligt. Med dessa åtgärder kan en komfortabel inomhustemperatur bibehållas efter tio timmar utan aktiv uppvärming.

Nyckelord: Värmetröghet, värmelagring, energianvändning, betong, värmeövergångsmotstånd, tung stomme, lättbetongstomme

Abstract

The development of more energy-efficient buildings is today mostly a matter of using less energy than current building norms requirements. A means of responding to the ever-tighter energy requirements is to make use of the energy-storing ability. In order to fully utilize a building's energy-storing ability, a heavy frame composed of brick, concrete, lightweight concrete or other stone materials must be selected, as they have better ability to store and deliver surplus-heat than a lightweight frame.

The thesis aims to examine how energy storage works and what factors that provide the most advantageous indoor temperature when heat supply ceases during ten hours. From a social perspective, the profit with suspensions of heat is that energy companies ' power peaks will be lower. In addition, a delayed power consumption could probably use the industry's excess heat. From the user perspective the profit is reduced heating and a possible opportunity to buy cheaper energy.

The results of the simulations show that the most effective measure for reducing the temperature difference is to reduce the surface resistance, which is also the most difficult. Other important measures are to allow a roof, foundation and inner as well as outer walls to be made of concrete. Furthermore, the building should be as airtight as possible and surfaces should be smooth and well-exposed. With these measures, a comfortable indoor temperature can be maintained during ten hours without active heating system.

Keywords: thermal inertia, energy storage, energy use, concrete, surface resistance, heavy frame, lightweight concrete frames

Förord

Examensarbetet har utförts under våren 2013 vid Lunds Tekniska Högskola vid Campus Helsingborg. Rapporten skrevs vid Avdelningen för Byggnadsmaterial och omfattar 22,5 högskolepoäng.

Jag vill tacka mina handledare *Peter Johansson* på avdelningen för byggmaterial och *Anders Rönneblad* på Cementa för inspiration, råd och hjälp under arbetets gång . Slutligen vill jag passa på att tacka min familj och vänner som har stöttat mig under både examensarbetet och under utbildningen.

Helsingborg, maj 2013

Björn Hardenhill

Innehållsförteckning

1 Inledning ... 1
1.1 Bakgrund ... 1
1.2 Syfte ... 2
1.3 Metodik ... 2
1.4 Avgränsningar ... 2

2 Teori ... 3
2.1 Värmetransportmekanismer ... 3
2.1.1 Strålning ... 3
2.1.2 Konvektion ... 4
2.1.3 Värmeledning ... 4
2.2 Termiska egenskaper ... 4
2.2.1 Värmeledningsförmåga ... 4
2.2.2 Värmekapacitet ... 5
2.2.3 Värmediffusivitet, inträngningsdjup och värmeeffusivitet ... 5
2.3 Värmeflöden i en byggnad ... 7
2.4 Värmelagring ... 7
2.4.1 Aktiv och passiv värmelagring ... 7
2.4.2 Betongens betydelse ... 8
2.4.3 Tidskonstanten ... 9
2.4.4 Konstant kontra varierande inomhustemperatur ... 9
2.4.5 Övergångsmotstånd ... 10
2.5 Energibesparingar ... 12
2.5.1 Nattventilation ... 13
2.5.2 Exponera betongytor ... 13
2.5.3 Aktiv värmelagring ... 13
2.5.4 Värmedynamisk styrstrategi ... 14

3 Mätningar ... 15
3.1 Mjukvaran ... 15
3.1.1 Begränsningar ... 16
3.2 Utförande ... 16
3.2.1 Förenklingar ... 17
3.2.2 Stomuppbyggnad ... 17

4 Resultat ... 20
***4.1* Presentation av mätdata ... 20**
4.1.1 Jämförelse mellan tung och lätt stomme ... 20
4.1.2 Jämförelse mellan tung stomme och lättbetongstomme ... 20
4.1.3 Påverkan av övergångsmotståndet ... 21
4.1.4 Påverkan av otätheter ... 22
4.1.5 Påverkan av innerväggar ... 23
4.1.6 Påverkan av golvkonstruktion ... 25
4.2 Eventuella felkällor ... 26

5 Diskussion och slutsatser 27
5.1 Fortsatta studier 28
6 Källförteckning 29
6.1 Tryckt litteratur 29
6.2 Elektroniska källor 30
6.3 Muntliga källor 31

1 Inledning

Kapitlet ger en kort beskrivning av bakgrunden till examensarbetet följt av studiens syfte och vilken metodik som används. Studiens syfte definieras i form av några frågeställningar och avgränsningar behandlar omfattningen av arbetet.

1.1 Bakgrund

I takt med nya rapporter om klimatförsämringar märks en ökad miljömedvetenhet. Detta gäller även inom byggsektorn, som står för en betydande del av den totala energianvändningen. Kombinationen av högre energikostnader för byggande och konsumenter som önskar bostäder med lägre energianvändning, bidrar till en mer hållbar utveckling på sikt.

En annan bidragande orsak till utvecklingen är Boverkets skärpta kravnivåer på byggnaders specifika energianvändning. Många aktörer ligger långt före med byggnader med mycket lägre energianvändning än vad Boverkets byggregler kräver. Merparten av dessa byggnader klassas som passivhus vars princip är att energi som alstras i byggnaden tas tillvara på istället för att använda traditionella uppvärmningssystem som ökar energiförbrukningen. Detta möjliggörs genom välisolerade väggar och mycket lufttäta skal. Nackdelen med dessa byggnader är solinstrålningen måste begränsas för att slippa övertemperaturer. Vanligtvis gör detta genom att små fönster väljs vid solutsatta lägen eller kraftiga solskydd för att slippa ökade kostnader för kylning av bostaden.

Av kostnadsskäl byggs nästan alla villor som är passivhuscertifierade med en så kallad lätt stomme bestående av reglar och isolering i flera lager. En rapport visar att ytterväggar av lättbetong kostar ca 600 kr/m² mer än en yttervägg av trä, men tar bara hälften av tiden att uppföra [1]. Den dyrare lösningen väljs oftare i byggnader såsom skolor, kontor och flerfamiljshus, som alstrar mer energi i form av fler installationer och fler människor, byggs istället med en så kallad tung stomme. Den tunga stommen som består av tegel, lättbetong eller betong har en annan möjlighet att lagra överskottsvärmen och på så sätt undvika övertemperaturer. Denna värmelagring ligger till grund för denna studie.

1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att undersöka hur värmelagring fungerar allmänt och vilken påverkan olika stomlösningar för en villa har. I tillägg undersöks vilken påverkan övergångsmotståndet har samt hur det kan minskas.

1.3 Metodik

För att uppnå rapportens syfte genomförs en litteraturstudie för att få underlag för att beskriva värmetransport, termiska egenskaper, värmelagring och dess användningsområde samt olika relaterade begrepp.

Därefter genomförs simuleringar i VIP Energy [2] i syfte att se hur värmelagringen verkar då tillförd effekt stoppas.

1.4 Avgränsningar

Rapporten avgränsas till värmelagring i tre olika stommar av betong, lättbetong och gipsregelvägg. Rapporten har inte för avsikt att undersöka påverkan av olika ballast, inblandning av diverse betongtillsatser eller att undersöka effekten av förbättrad styr- och reglerteknik.

2 Teori

Kapitlet inleds med en kort genomgång av värmetransportmekanismer, betongens termiska egenskaper och dess användning i stommar. Därefter följer en beskrivning av begreppet värmelagring och hur den kan nyttjas. Slutligen följer en genomgång av övergångsmotståndet och dess påverkan på värmelagringen.

2.1 Värmetransportmekanismer

2.1.1 Strålning

En kropp utsänder elektromagnetisk strålning, så kallad värmestrålning. Det beror på att kroppar avger och mottar konstant strålning så länge temperaturen är varmare än den absoluta nollpunkten [3]. Strålningen från en yta är starkt beroende av temperaturen, men även beroende av ytans beskaffenhet enligt ekvation:

$$q = \gamma \cdot T^4 \qquad \text{(ekvation 1)}$$

där

q är värmeflödestätheten W/m^2
γ är en konstant som beror på ytans färg och struktur
T är kroppens temperatur i Kelvin [4]

En kropp som absorberar all strålning den mottar kallas en svart kropp. Hos en verklig kropp blir strålningsintensiteten lite lägre. Hur mycket lägre anger emittansen, ε, som är ett mått på hur en verklig kropp strålar i jämförelse med en svart kropp. Strålningen för en vanlig kropp tecknas:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma_s \cdot T^4 \qquad \text{(ekvation 2)}$$

där

ε är emittansen (-)
q är värmeflödestätheten i W/m^2
σ_s är $5.7 \cdot 10^{-8}$ $W/m^2 K^4$(Stefan Boltzmanns konstant)
T är kroppens temperatur i Kelvin

Vid strålningen mot en yta, kommer en del av den elektromagnetiska strålningen absorberas, en del att transmitteras och en del att reflekteras. Summan av dessa är lika med den totala infallande strålningen. I praktisk byggnadsfysik delas strålningen upp i två olika typer: solstrålning och strålning mellan ytor. Den direkta solstrålningen har mycket hög temperatur och strålningen är kortvågig, medan strålning mellan ytor är långvågig och har normal temperatur [5]. I denna studie bortses solstrålning i simuleringarna.

2.1.2 Konvektion

Med konvektion menas ett strömmande medium, ofta luft, som transporterar värme från ett ställe till ett annat i syfte att utjämna temperaturskillnader. Varm luft är lättare än kall och det skapar en naturlig cirkulation som benämns naturlig konvektion. Dess motsats är påtvingad konvektion som innebär att vinden eller fläktar får luften att cirkulera. Orsaken till detta kan vara ventilation eller otätheter i väggar [4].

2.1.3 Värmeledning

Värmeledning innebär att det sker en värmetransport i ett material. Orsaken är att energi överförs mellan molekyler och det sker överallt det finns skillnad i temperatur [6].

2.2 Termiska egenskaper

2.2.1 Värmeledningsförmåga

Värmeledningsförmåga, λ, definieras som den värmemängd som per sekund passerar genom en m^2 av ett material med en meters tjocklek då temperaturdifferensen är en grad. I stort sett alla byggnadsmaterial, däribland betong, är porösa. Det påverkar värmeisoleringsförmågan eftersom luftens värmeledningsförmåga endast är några 100-delar av betongens [5].
I dessa porösa material sker värmeövergången utöver värmeledning till viss del även genom konvektion och strålning. De senare räknas normalt in i λ-värdet [7].

Tabell 1 visar värmeledningsförmågan för några vanliga material [5].

Material	**Densitet** [kg/m^3]	**Värmekonduktivitet** [W/(m·K)]
Betong	2300	1.7
Luft	1.2	0.026
Lättbetong	400	0.12
Trä	500	0.14
Gips	800	0.22
Mineralull	15-150	0.033-0.040
Stål	7850	60

2.2.2 Värmekapacitet

Värmekapaciteten, c_v, är den värmemängd som krävs för att höja en viss kropps temperatur med en grad. Sätts värmekapaciteten i relation till kroppens vikt betecknas den specifik värmekapacitet, c_p, och har enheten J/(kg·K) eller Ws/(kg·K) [4].

Tabell 2. Specifik värmekapacitet för vanliga material [5].

Material	**Densitet** [kg/m^3]	**Specifik värmekapacitet** [J/(kg·K)]	**Värmekapacitet** [kJ/(K·m^3)]
Betong	2300	900	2070
Tegel	1500	800	1200
Lättbetong	500	1000	500
Trä	500	1500	750
Gips	900	800	720
Mineralull	15-150	800	12-120
Stål	7800	500	3900

2.2.3 Värmediffusivitet, inträngningsdjup och värmeeffusivitet

Värmediffusivitet är ett mått på hur snabbt ett material anpassar sig tidsmässigt till omgivningen. Värmediffusiviteten, *a*, beror på värmeledningsförmågan, densiteten och den specifika värmekapaciteten enligt formeln:

$$a = \lambda / (\rho \cdot c_p) \qquad \text{(ekvation 3) [7]}$$

När det gäller förmågan att utnyttja dagens lagrade överskottsvärme på insidan av ytterväggarna till natten, har även det periodiska inträngningsdjupet, d_p, betydelse. Det anger hur stor del av materialet under ett dygn som är aktivt. Eftersträvas värmelagring i innerväggar i betong, behöver dessa inte vara mer än 15 centimeter tjocka. Tjockare väggar kan inte lagra mer värme [8].

Tabell 3. Periodisk inträngningsdjup för en temperaturcykel på ett dygn [9].

Material	**Inträngningsdjup** (cm)
Sten (granit)	21
Betong	15
Tegel	11
Gips	9
Trä	7
Lättbetong	9
Mineralull	16

.

Värmeeffusivitet, ε, är ett mått på hur lätt ett material förmår att absorbera värme och tecknas:

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \qquad \text{(ekvation 4) [10]}$$

Indata från tabell 1 och 2 ger tabell 4:

Tabell 4 visar värmediffusivitet och värmeeffusivitet för vanliga material

Material	**Densitet** [kg/m^3]	**Värmediffusivitet** [m^2/s]	**Värmeeffusivitet** [Ws$^{-0.5}$/ (m^2·K)]
Betong	2300	$0.82 \cdot 10^{-6}$	1876
Trä	500	$0.28 \cdot 10^{-6}$	265
Stål	7800	$15.41 \cdot 10^{-6}$	15297

Sammantaget har betong en förmåga att lätt absorbera värme och släpper den långsamt, vilket gör den värmetrög. Den termiska trögheten för tunga stommar ändras inte så snabbt i takt med utetemperaturens variation jämfört med en lätt stomme.

2.3 Värmeflöden i en byggnad

För ett komfortabelt inomhusklimat ska uppnås måste det finnas ett uppvärmningssystem som balanserar värmetillskott mot värmeförluster. Värmeförluster sker genom förluster i klimatskal, ventilation, avlopp och värmesystem. Värmetillskottet består av gratis och köpt energi. Den köpta energin används till uppvärmning av luft och vatten. Gratisenergin består av solinstrålning och brukarnas kroppsvärme. Den värme som elektrisk apparatur avger kan ibland även kallas gratisenergi, då syftet i första hand att skapa ljus och driva olika apparater [11].

2.4 Värmelagring

Värmelagring i ett byggnadsmaterial innebär att värme upptas i materialet för att sedan kunna avges. Det finns två sätt att kombinera värmelagring med komfortabelt inneklimat. Det ena sättet är optimering av materialets densitet, tjocklek, värmeledning och värmekapacitet. Det andra sättet innebär att koppla samman det värmelagrande materialet med pumpar, värmeväxlare och fläktar [12].

Hur mycket värme som kan lagras beror på en rad faktorer såsom stomlösning, värmesystem, fönsters storlek och orientering, vilken typ av verksamhet byggnaden har och var den är placerad geografiskt [13].

2.4.1 Aktiv och passiv värmelagring

När värmetransporten sker spontant mellan det värmelagrande materialet och inomhusluften utan hjälp av pumpar, värmeväxlare och fläktar kallas det passiv värmelagring [12].

När stommen nyttjas som en del av värmesystemet kallas det för aktiv lagring. Detta kan ske med genom att koppla samman det värmelagrande materialet med pumpar, värmeväxlare och fläktar. Detta sker genom att gjuta in värmesystemets rör i konstruktionen eller att låta tilluft passera genom hålrummen i bjälklagselement [14].

TermoDeck är ett exempel på håldäcksbjälklag där ett centralt värmeåtervinningssystem sköter uppvärmning och ventilation. Fördelarna är att frånvaro av störande ljud från ventilationssystemet och vattenburna radiatorer.

Vintertid fungerar bjälklagsytorna som stora lågtempererade radiatorer då den uppvärmda tilluftens energi tas upp av bjälklaget. Under sommartid utnyttjas istället kall nattluft för nedkylning av bjälklagen och för att ta upp dagvärmen [15].

Ett exempel på hur den aktiva värmelagringen kan användas i framtiden för att minimera energianvändningen är stadsdelen Hyllie i Malmö. Visionen är att energiförsörjningen år 2020 ska till 100 % bestå av förnybar eller återvunnen energi. Kravet är att alla byggnader byggs med värmetröga betongstommar som förbinds med ett smart nät som gör det möjligt att flytta överskottsvärme och därmed effektuttag i tiden. Detta möjliggör genom att betongen kan laddas, värmas upp och sedan stängas av i några timmar [16].

2.4.2 Betongens betydelse

Kombination av betongens värmelagrande förmågan och förmågan att leda värme gör den värmetrög. Ledningsförmågan kan ökas genom att öka densiteten och minska porositeten. Det är möjligt genom att till exempel sänka vattencementtalet och inte använda tillsatser som genererar luft. I tillägg kan tunga delmaterial, som till exempel tung ballast, användas. Vanligtvis ersätts då hela eller delar av ballasten med magnetit, som kan öka densitet till nästan det dubbla [17].

I en studie undersöktes möjligheten att förbättra betongs termiska egenskaper med olika tillsatsmaterial, däribland magnetit. De övriga tillsatsmaterialen var expanderad grafit, makroinkapslad PCM (fasomvandlingsmaterial), mikroinkapslad PCM, PCM i påsform, PCM som emulsion, stålfiber, kopparfiber samt mässingsspån. Mätningarna, som utfördes på både fuktig och torr betong, registrerade hur temperaturen på ytan och inne i provkropparna förändrades. Syftet var att se hur betongen betedde sig vid upptagning och avgivning av värme.

Resultaten visade att fasomvandlingsmaterial sänker i regel värmelednings-förmågan och ökar värmekapaciteten. Betong med expanderad grafit, mässing eller mycket stålfiber har däremot både högre värmekapacitet och högre värmeledningsförmåga jämfört med referensbetongen. Med mer cementpasta minskar värmeledningsförmågan men värmekapaciteten ökar. Resultaten visade även att hög fuktighet bidrar till ökad värmeledning i de flesta betonger [13].

Värmekapaciteten och värmeledningsförmågan kan ökas med minst 50 %, vilket innebär att 50 % mer värme kan lagras i byggnadskonstruktionen. Detta

behöver inte alltid vara en fördel, men när det snabbt gäller att lagra värmen från några timmars intensiv solinstrålning är det bra. En annan nackdel gäller det ekonomiska perspektivet. Magnetit är mycket dyrare i inköp, transport och vid gjutning. Troligtvis är även grafit och koppar allför dyrt för att användas regelbundet i betongbyggande [18].

2.4.3 Tidskonstanten

Tidskonstanten, τ, är ett mått på en byggnads värmetröghet och den beräknas genom att dividera byggnadens värmekapacitet med ventilations- och transmissionsförluster. Beträffande ventilationsförlusterna tas hänsyn till värmeåtervinning.

Ett alternativt sätt att beräkna tidkonstanten är att mäta den tid det tar innan 63 % av sluttemperaturen är uppnådd efter en temperaturförändring har skett. Temperaturförändringen kan bero på utetemperaturen eller förändring av någon intern last [11].

Byggnadens värmetröghet är beroende av konstruktionslösning. För att använda sig av den termiska trögheten måste den dimensionerande vinterutetemperaturen (DVUT) först tas fram. DVUT behövs för att beräkning av effektförluster och den anger den lägsta temperaturen som beräkningen ska utgå från. Det geografiska läget och byggnadens värmetröghet påverkar värdet av DVUT.

Tidskonstanten kan variera från under 100 timmar till uppemot 300 timmar för samma hus beroende om det är en lätt eller tung stomme. Skulle ett hus med tung stomme dessutom ha mellanväggarna av betong, som är vanligt i flerbostadshus, skulle tidskonstanten vara uppemot 500 timmar [19].

En stomme som har ett högt värde påverkar inte innetemperaturen eller värmesystemets effektbehov nämnvärt vid kortvariga förändringar som till exempel de interna lasternas eller utetemperaturens dygnsvariation [20].

2.4.4 Konstant kontra varierande inomhustemperatur

Många byggnader styrs idag av system som är konstruerade för att hålla en konstant inomhustemperatur. Dessa traditionella självreglerande system styrs endast av utetemperaturen [11]. Resultatet blir att varje liten temperatur-förändring måste justeras med mer kyla eller värme. Dessutom gör

byggnadens värmetröghet att installationssystemet många gånger inte ligger i fas. Ett alternativt sätt att styra inomhusklimatet är dynamisk styrning med hjälp av inomhustemperaturer. Då tas byggnadens värmedynamik med i styrningen. När styrningen är kontrollerad och kan tillåta små temperatur-variationer, som till exempel en halv grad, kan bra resultat erhållas. Erfarenheter från fastighetsägare som infört dynamisk kontrollerad styrstrategi uppger att inomhusklimatet förbättrats [14].

2.4.5 Övergångsmotstånd

Värmeutbyte mellan luft och fast material utgör grunden vid nästan alla temperaturberäkningar. Skillnad görs mellan värmeutbyte som sker genom strålning och genom konvektion. Värmeutbyte vid strålning bestäms av den aktuella ytans temperatur och de omgivande ytornas temperatur eller motstrålande temperatur [17]. Värmeövergångskoefficienten, α_s, för strålning kan skrivas:

$$\alpha_s = 4 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma_s \cdot T_m^3 \text{ [W/m}^2\text{K]} \qquad \text{(ekvation 5)}$$

där

σ_s är $5.7 \cdot 10^{-8}$ W/m^2 K^4 (Stefan Boltzmanns konstant)
T_m är medelvärdet av två ytors temperatur i Kelvin
ε_{12} är emittansen (-) Den ges av $1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2)$

där

ε_1 är emittansen (-) från yta 1
ε_2 är emittansen (-) från yta 2

Värmeutbyte vid konvektion sker genom luft- eller vätskerörelser. [17] För luft kan skillnader i luftens densitet orsakade av temperaturen skapa rörelser. Detta fenomen kallas egenkonvektion. Dess motsats är påtvingad konvektion i form av vind eller fläktar. Nedan ges några empiriska samband på grund av konvektion.

För egenkonvektion vid innerväggar kan värmeövergångskoefficienten α_k, med enheten W/m^{2}K, skrivas:

$$\alpha_k = C \cdot (T_1 - T_0)^{1/4} \qquad \text{(ekvation 6)}$$

där

$T_1 - T_0$ är temperaturdifferensen mellan ytorna i Kelvin
C är en konstant som beror på lufthastigheten vid ytan. Den har följande värde:

C = 2.0 för innerväggar
C = 0.6 för varma tak och kalla golv
C = 2.6 för varma golv med golvvärme

Ytterligare 1.0 bör adderas till C för rum med mekanisk ventilation

Värmeövergångskoefficienten, α_k, för påtvingad konvektion inomhus kan skrivas:

$\alpha_k = 6 + 4 \cdot u$, $u \leq 5$ m/s [W/m^{2}K] (ekvation 7)

$\alpha_k = 7.41 \cdot u^{0,78}$, $u \geq 5$ m/s [W/m^{2}K] (ekvation 8)

där

u är lufthastigheten (m/s) parallellt med ytan

Värmeövergångsmotståndet vid ytor ges av

$R = 1/ (\alpha_s + \alpha_k)$ [m^{2}K/W] (ekvation 9)

De riktvärde som är europastandard för övergångsmotstånd på insidan (R_{si}) och utsidan (R_{se}) är medelvärde under uppvärmningssäsongen:

R_{si} = 0.10 m^{2}K/W för tak
R_{si} = 0.13 m^{2}K/W för väggar
R_{si} = 0.17 m^{2}K/W för kalla golv
R_{se} = 0.04 m^{2}K/W för utomhus

Vid beräkning av värmeflöden i konstruktioner saknar de verklig betydelse, då de är mycket små i förhållande till det totala värmemotståndet. Däremot har de avgörande betydelse beräkning av yttemperaturer [5].

En studie som bland annat undersökte möjligheten att reducera energibehov genom värmelagring fann att ytmotståndet har stor betydelse för hur mycket energi som kan lagras. Med den ekvivalenta tjockleken för ytmotstånd ,d, är beroende av värmeövergångsmotståndet och värmekonduktiviteten enligt:

$d = R_{si} \cdot \lambda$ (ekvation 10)

där

λ är värmekonduktiviteten [W/(m·K)]

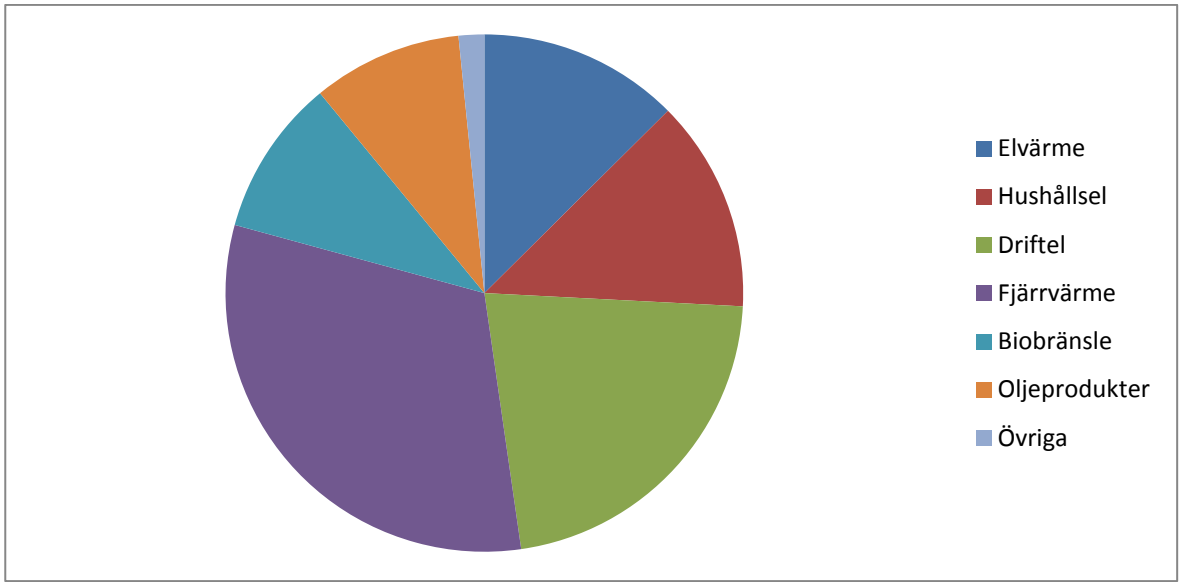
Om värmeövergångsmotståndet sattes till noll blev det periodiska inträng-ningsdjupet, d_p, lika stort som konstruktionsdelens tjocklek, D. Om istället värmeövergångsmotståndet, 0.13 m^2K/W, användes under ett dygn blev resultatet att endast mellan 30 till 40 % av värmelagringen kunde nyttjas [9].

Betongens yta kan i viss mån också påverka motståndet. En skrovlig yta bromsar luftflödet vilket är en nackdel, medan en vågig yta är en fördel genom att vågformad yta är större och kan därför lagra mer värme. Ett ytterligare sätt att påverka värmeövergångsmotståndet är genom ökad lufthastighet. Den ökade luftrörelsen, konvektionen, ger minskat motstånd [21].

2.5 Energibesparingar

Av Sveriges totala energianvändning 2010, utgör energianvändningen inom sektorn bostäder och service 25 % [22]. Detta motsvarar 156 TWh. Dessa är i sin tur fördelade enligt följande:

Figur 1 visar fördelningen av den energi som användes av bostäder och servicesektorn 2010



Med stigande energipriser finns det stor potential i att sänka energianvänd-ningen genom att bygga energieffektiva byggnader. För att skapa en

energieffektiv byggnad behöver den vara välisolerad och med minimalt luftläckage och minimala köldbryggor. Vidare finns det fler energibesparingar att göra, speciellt för byggnader med betong [14].

2.5.1 Nattventilation

Ett sätt att minska energianvändningen i värmetröga byggnader är att använda nattventilationen. Det innebär att ventilationsflödet ökas när det finns överskottsvärme i byggnaden och då tas kallare uteluft in. Denna åtgärd kan minska eller eliminera användningen av luftkonditionering i kontorsbyggnader. Kombinationen av nattventilation och hög termisk massa kan minska energianvändningen för kylning med upp till 50 % [23].

2.5.2 Exponera betongytor

Ett annat sätt att utnyttja betongens värmelagringsförmåga bättre är genom att inte täcka ytorna utan låta dem exponeras [14]. Golv har generellt en plastmatta eller ett trägolv för komfortens skull. Betongväggar kan däremot målas istället för att gipsas för att bibehålla den goda värmelagringsförmågan. Vidare har innertak har ofta heltäckande ljudabsorbenter, men med rätt montering kan betongens fördelar användas bättre. Vanligtvis behövs ljudabsorbenter i till exempel kontor och skolor på grund av att luftljudsabsorptionen hos betong är låg. Eftersom dessa är värmeisolerande gäller det att använda dessa på ett sätt som tar vara på betongens värmelagrande förmåga och ge en god akustisk miljö. Det finns olika lösningar på detta problem som låter rumsluften strömma mot taket genom springor mellan absorbenterna. [24].

2.5.3 Aktiv värmelagring

Ett sätt att använda aktiv värmelagring att låta tilluft passera genom hålrummen i bjälklagselement. Ett centralt värmeåtervinningssystem sköter uppvärmning och ventilation, och den uppvärmda tilluften sakta värmer upp bjälklagsytorna. Vid nedkylning förs istället kall luft genom hålbjälklagets labyrintsystem. Fördelarna är att radiatorer är onödiga och ventilationen orsakar varken drag eller ljud. Dock visar en studie att den höga relativa fuktigheten under lång period skapar grogrund för mögel, vilket ger dålig tilluft [9].

2.5.4 Värmedynamisk styrstrategi

En studie undersökte fem system med värmedynamisk styrstrategi och jämförde dessa med traditionell installationsteknik. Resultatet visade på en tydlig minskning av energianvändningen för uppvärmning och minskad toppeffekt. Systemen kan med framgång användas både vid nyproduktion och vid ombyggnad [25].

3 Mätningar

Kapitlet ger en kort beskrivning av det använda simuleringsprogrammet, vilka tester som genomförts och vilka parametrar som använts.

3.1 Mjukvaran

Programmet, VIP Energy 3, beräknar energiförbrukningen i byggnader. Det är uppbyggt kring en dynamisk beräkningsmodell, där beräkningen upprepas timme for timme. Tidsperioden som mäts kan vara från några timmar till ett år. Alla energiflöden beräknas utifrån kända eller mätbara faktorer. Det som styr beräkningen är varierande krav på rumstemperatur och luftväxling men hänsyn tas även för påverkan av klimatfaktorerna lufttemperatur, sol, vind och luftfuktighet.

I VIP Energy finns det ett flertal beräkningsmodeller. Några av dessa modeller är beräkning av värmelagring, luftflöden, solstrålning genom fönster, värmepumpar, solfångare. Dessa kan delas in i de två huvudsystemen luft och energi. Luftsystemet innefattar vindtryck, termik, läckage och ventilations-flöden, vilka balanserar tillförd och bortförd luft. Energisystemet balanserar tillförd, bortförd och lagrad energi som påverkas av energiflöden från bland annat sol, luftomsättning och transmission. I tillägg finns beräkningsmetoder för 2-dimensionell och 3-dimensionell värmeströmning, som bygger på finit differensberäkning. Detta betyder att alla valda material delas in i ett antal rektanglar eller kuber. Sedan beräknas energiflöden och temperaturer upprepade gånger till jämvikt uppstår i både modellen som helhet och i varje materialdel.

I programmet är det möjligt att välja mellan en enzonsmodell och en flerzonsmodell. Med enzonsmodellen uppnås bäst beräkningsresultatet för byggnader som innehåller homogen verksamhet med jämförliga temperaturkrav. För fastigheter med olika zoner med skilda temperaturkrav lämpar sig flerzonsberäkning bäst. För kontorshus och småhus kan hela byggnaden beskrivas som en sammanhängande volym eftersom dess volym vanligtvis fungerar som sammanhängande luftceller.

3.1.1 Begränsningar

VIP-Energy är inte avsett för dimensionering av effektbehov för värme och kyla utan det är optimerat för beräkning av hela byggnaders energianvändning. Till följd av det väljs vissa parametrar internt i programmet och det har även påverkat val som gjorts i de till installationen medföljande klimatfilerna. Ett exempel på valda parametrar är det inre värmeövergångstalet, där strålning beräknas ut av programmet självt, medan det konvektiva värmemotståndet kan ändras. I programmet är det inre värmegångstalet förvalt till 3W/ m^2K. Detta värde är inversen av det konvektiva värmemotståndet. Enligt ekvation 9 gäller $R = 1/ (\alpha_s + \alpha_k)$. Antas värdet för R_{si} till 0.13 m^2K/W, vilket är riktvärde för väggar, kan strålningen α_s med enheten W/m^2K räknas fram:

$R_{si} = 1/ (\alpha_s + 3)$ ger

$\alpha_s = 4.67$

Med ett värde på strålningen borde det vara enkelt att räkna fram vilket värde det konvektiva värmemotståndet ska ha inför simulering med dubbelt värmeövergångsmotstånd. Det första problemet är matematiskt, då α_k antar ett negativt värde. Det kan inte bli lägre än noll. Det andra problemet är att strålningen är ickelinjär. Ekvation 5 ger att $\alpha_s = 4 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma_s \cdot T_m^3$, det vill säga strålningen är en exponentialfunktion. Sammanfattningsvis kan inte exakta värden på värmeövergångsmotståndet väljas utan istället får simuleringar utföras med förhöjt respektive reducerat värmeövergångsmotståndet.

3.2 Utförande

Den grundläggande frågan för simuleringarna var att se vad som händer med temperaturen i olika byggnader när all uppvärmning upphör tvärt. Det fanns tre syften med simuleringarna och det första var att jämföra temperaturförändringarna mellan en lätt och en tung stomme. Det andra var att jämföra värmelagringen med avseende på inträngningsdjupet mellan en yttervägg av tjock betong med en tunnare av lättbetong. Det tredje syftet var att jämföra effekten av ett kraftigt reducerat respektive ett kraftigt ökat inre värmeövergångsmotstånd. I tillägg undersöktes även påverkan av luftflöde, träbjälklag som golv och ersättning av innerväggar av reglar och mineralull med massiv betong.

3.2.1 Förenklingar

För att möjliggöra de önskade simuleringarna gjordes vissa val och förenklingar:

- Utetemperaturen sattes till 0˚ C konstant
- Lufttrycket valdes till 1000 hPa
- Vindriktningen låstes från söder och hastigheten sattes till noll
- Relativ fuktighet ute sattes till 100 %
- Ingen solinstrålning
- Rumstemperaturen sattes till konstant 20˚ C vecka 1-22, därefter till 0˚C
- En värmepump med vattenburen värme stod för all värme
- Klimatzon I (Norr)
- Marken består av silt
- Viktning av U-medelvärde med hänsyn till golvarea, A_{temp}
- Ventilationen var mekanisk frånluft
- Värdet på frånluft och tilluft var konstant 0.35 l/s
- Otäthetsfaktorn eller luftflödet var förinställt på 0.80 l/s, m^2
- Referensbyggnaden var en enplansvilla på 142 m^2
- Fönsterandelen av totala ytterväggsytan var 18 %
- Taket approximerades som ett helt platt tak
- Den invändiga höjden satte till 2.5 meter
- De olika stommarnas väggar hade samma u-värde, 0.201 W/ m^2·K
- Alla stommar hade samma platta på mark av betong utom i ett fall
- Alla stommar hade samma dörr och fönster med u-värde, 1 W/ m^2·K

3.2.2 Stomuppbyggnad

Byggnaden är en enplansvilla på 142m^2 utan källare och med platt tak. Nedan visas byggnadens uppbyggnad.

Beskrivning	**Byggdelstyp**	**Orientering**	**Area** [m^2]	**U-värde** [W/m^2·K]	**Otäthets-faktor** [l/s, m^2]
Yttervägg 1	Väggtyp 1	Norr	26.9	0.201	0.8
Yttervägg 2	Väggtyp 1	Väster	32.8	0.201	0.8
Yttervägg 3	Väggtyp 1	Öster	23.7	0.201	0.8
Yttervägg 4	Väggtyp 1	Söder	26.9	0.201	0.8
Fönster 1	3 glas energi	Norr	6.8	1.000	0.8
Fönster 2	3 glas energi	Väster	8.0	1.000	0.8

Beskrivning	**Byggdelstyp**	**Orientering**	**Area** [m^2]	**U-värde** [$W/m^2 \cdot K$]	**Otäthets-faktor** [l/s, m^2]
Fönster 3	3 glas energi	Öster	0.0	1.000	0.8
Fönster 4	3 glas energi	Söder	8.9	1.000	0.8
Dörr	Port	Norr	2.1	1.000	0.8
Grundplatta	PPM	PPM 0-1 m	44,8	0.161	0.8
Grundplatta	PPM	PPM 1-6 m	97,6	0.133	0.8
Grundplatta	PPM	PPM > 6 m	0	0.125	0.8
Tak	Vindsbjl btg	Tak	164.9	0.097	0.8
Innervägg	Väggtyp 2	Inner	91.3	0.000	0.8

Det enda som egentligen skiljer stommarna åt var val av tak och ytterväggar. En likhet mellan de olika ytterväggarna är att de hade samma u-värde, 0.201 W/ $m^2 \cdot K$. Detta val har gjorts för att u-värdet beskriver hur god isolering en byggnadsdel har och med samma isoleringsvärde kan en med likvärdig bedömning göras. För taken skiljer u-värdet något. Värdet är 0.092 W/ $m^2 \cdot K$ för träbjälklag och 0,087 W/ $m^2 \cdot K$ för betongbjälklag.

I den följande översikten återfinns de olika stommarnas uppbyggnad. Det yttersta utvändiga skiktet anges först. Luftspalt och PE-folie är ej medräknade.

Stomme 1 - tung stomme

Ytterväggg [m]	Tak [m]	Golv [m]
Betong 0.060	Trä 0.020	Dränerande grus 0.200
Cellplast 0.200	Mineralull 0.400	Cellplast 0.200
Betong +0.150	Betong +0.160	Betong +0.100
Totalt 0.401	*Totalt* 0.580	*Totalt* 0.500

Stomme 2 – lätt stomme

Ytterväggg [m]	Tak [m]	Golv [m]
Trä 0.020	Trä 0.020	Dränerande grus 0.200
Gipsskiva 0.013	Reglar 0.200	Cellplast 0.200
Reglar/min.ull 0.195	Mineralull 0.200	Betong +0.100
Gipsskiva +0.013	Gipsskiva +0.013	*Totalt* 0.500
Totalt 0.241	*Totalt* 0.433	

Stomme 3 – lättbetong med dubbelgips

Yttervägg [m]	Tak [m]	Golv [m]
KC-bruk 0.010	Trä 0.020	Dränerande grus 0.200
Cellplast 0.050	Mineralull 0.400	Cellplast 0.200
Mineralull 0.100	Betong +0.160	Betong +0.100
Lecablock 0.100	*Totalt* 0.580	*Totalt* 0.500
Gipsskiva 0.013		
Gipsskiva +0.013		
Totalt 0.286		

4 Resultat

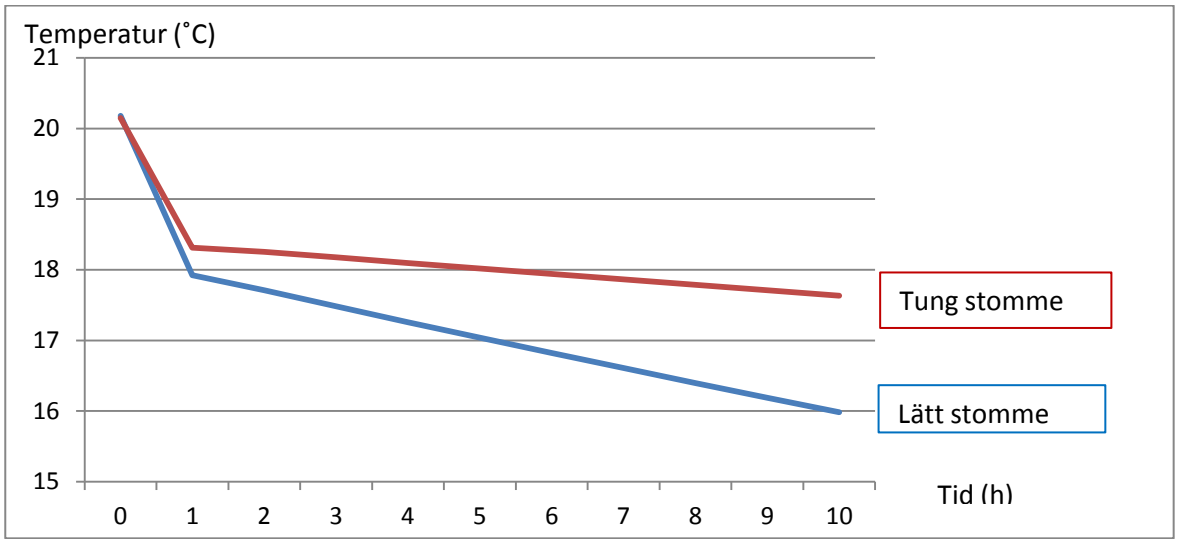
I detta kapitel presenteras resultatet av de sex jämförelser som baseras på utförda simuleringar i VIP Energy och de efterföljande bearbetningarna.

4.1 Presentation av mätdata

4.1.1 Jämförelse mellan tung och lätt stomme

De två första simuleringen gjordes i syfte att jämföra en lätt stomme (stomme 2) med en tung (stomme 1). I diagrammen nedan syns tydligt ett snabbare avsvalningsförlopp för den lättare stommen.

Figur 2 visar avsvalningsförloppet för en lätt respektive en tung stomme efter det uppvärmningen stängs av.

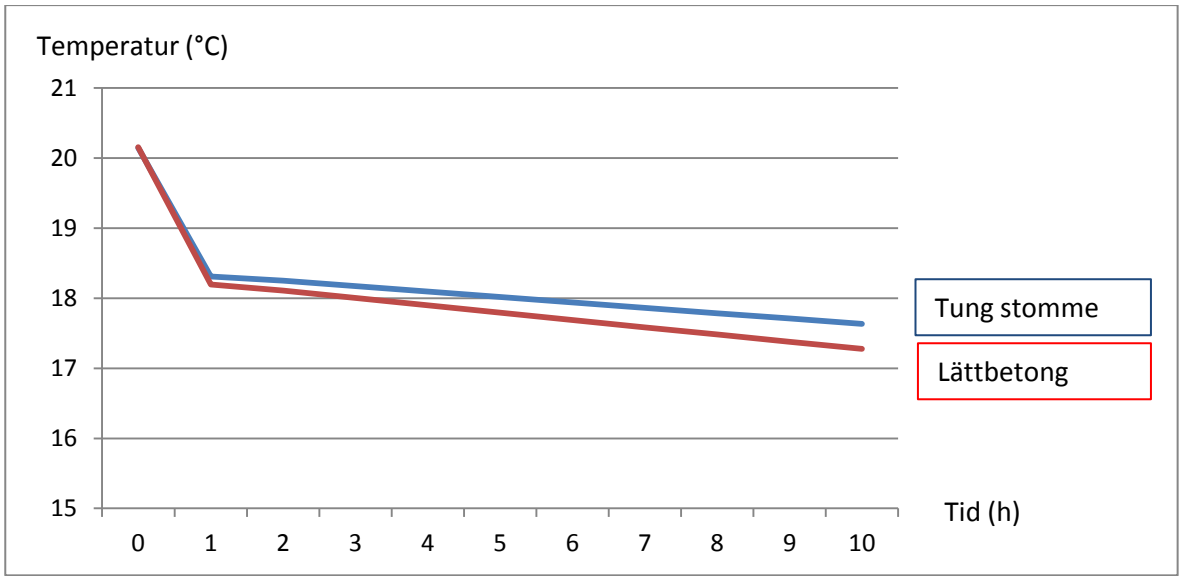


Resultatet överensstämmer väl med stommens inverkan på inomhustemperatur från avsnitt 2.2.3. Det vill säga att med en lätt stomme förändras temperaturen fortare vid ökad eller minskad värmetillförsel.

4.1.2 Jämförelse mellan tung stomme och lättbetongstomme

Följande resultat visar skillnader mellan en tung stomme (stomme 1) och en stomme med ett invändigt tunt skikt av lättbetong (stomme 3).

Figur 3 visar avsvalningsförloppet för en tung stomme respektive en stomme av lättbetong och dubbelgips.



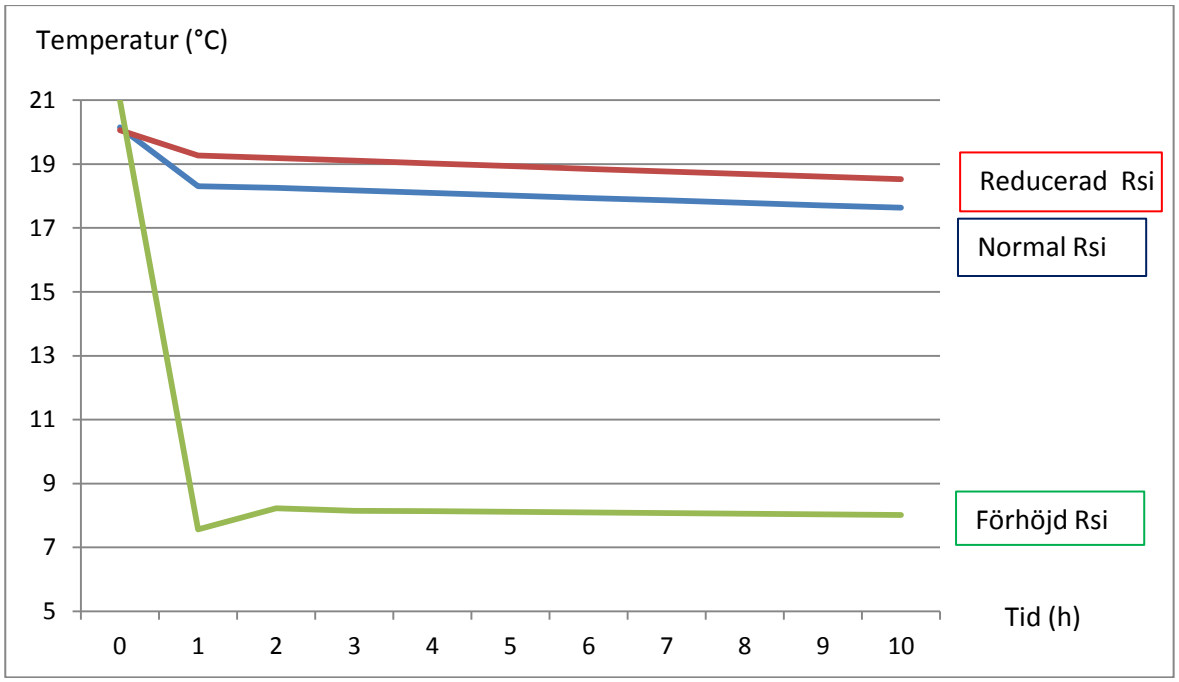
Skillnaden i temperaturförändring mellan de två konstruktionslösningarna är marginell. Efter tio timmar skiljer endast 0.4 ˚C. Även om betongen är 50 % tjockare än lättbetongen, skulle det kunna förklaras med att värmelagrings-förmågan beror av det periodiska inträngningsdjupet för lättbetong endast är 9 cm. Det vill säga att djupare behöver lättbetongen inte vara för att kunna lagra mesta möjliga värmeenergi.

Beträffande temperaturdifferensen skiljer det 1.6 gradtimmar mellan de båda stommarna. Gradtimmar innebär det specifika värmeenergibehovet, som i detta fall krävs för att kompensera lättbetongens större temperaturfall gentemot den tunga stommen. Den beräknas genom summan av temperatur-skillnaderna mellan de två stommarna multiplicerat med tiden då skillnaden varar [26].

4.1.3 Påverkan av övergångsmotståndet

Nästa test undersökte påverkan av övergångsmotståndet. Endast värdet på konvektionen kan förändras manuellt, medan strålningsverkan räknas ut av programmet, blir det svårt att exakt veta vad det nya värdet på värme-övergångsmotståndet. Detta skapar en viss osäkerhet beträffande hur stor genomslagskraften blir för ett förändrat värmeövergångsmotstånd. Nedan visas resultatet av simulering av olika R_{si} med den tunga stommen (stomme 1).

Figur 4 visar påverkan av ett reducerat respektive ett förhöjt värme-övergångsmotstånd med normalvärde som referens.

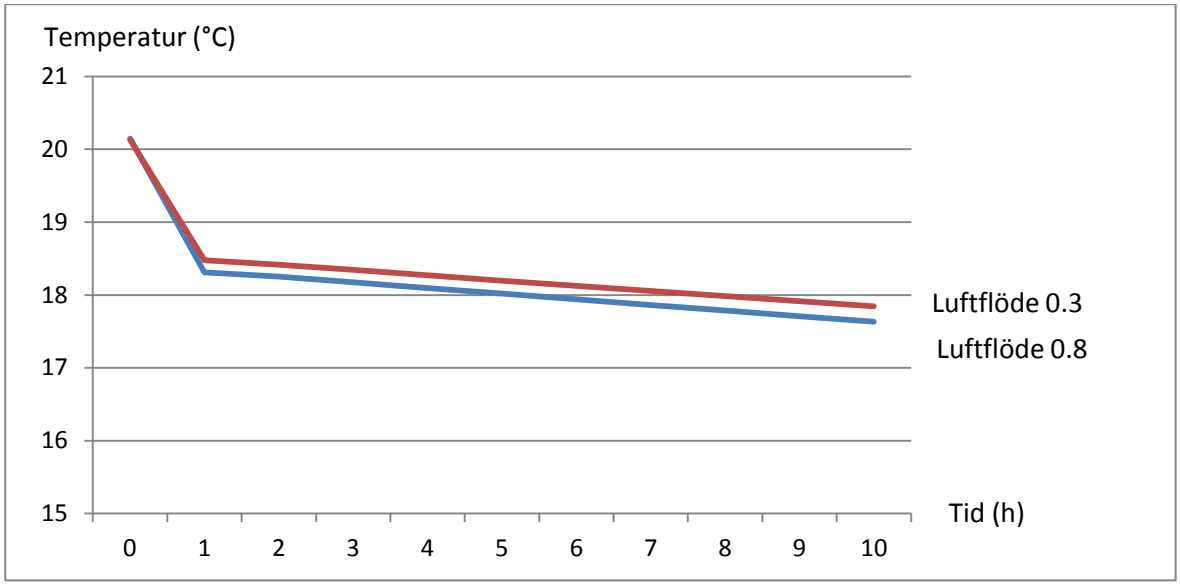


Simuleringen bekräftar att värmeövergångsmotståndet har stor betydelse. I enlighet med $d = R_{si} \cdot \lambda$ (ekv. 10) betyder ett lägre värmeövergångsmotstånd ett lägre ytmotstånd. Detta betyder i sin tur att yttemperaturen blir något högre och utjämning med omgivande luft blir mindre. Därav förblir temperaturen konstant en grad högre än i fallet med normalt värmeövergångsmotstånd.

4.1.4 Påverkan av otätheter

I programmet fanns ett förvalt värde på otäthetsfaktorn, vilket anger ett värde på det luftflöde som passerar genom konstruktionsdelen på grund av otätheter. Detta värde, 0.8 l/s, m^2, utgår från Boverkets senaste byggregler för otätheter från 1994 [26]. För att undersöka luftflödet inverkan jämfördes referensvärdet med 0.3 l/s, m^2, vilket är ett värde som ett tätt stenhus kan antas ha [28].

Figur 5 visar hur graden av otäthet påverkar temperaturfallet.

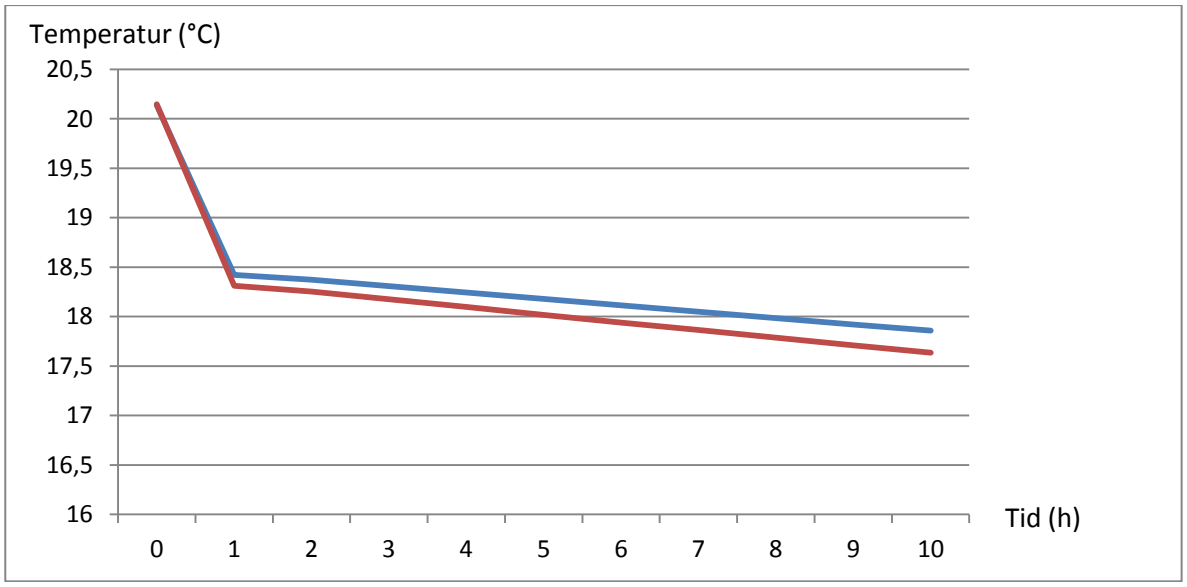


Simulering visar att luftflödet har betydelse, om än liten uttryckt i grader. Förklaringen kan vara att om luftflödet genom yttervägen är mindre, är även värmetransporten det. Med mindre värmenergiförlust genom väggen torde yttemperaturen vara högre, vilket förklarar det mindre temperaturfallet efter det att värmetillförseln stängts av.

4.1.5 Påverkan av innerväggar

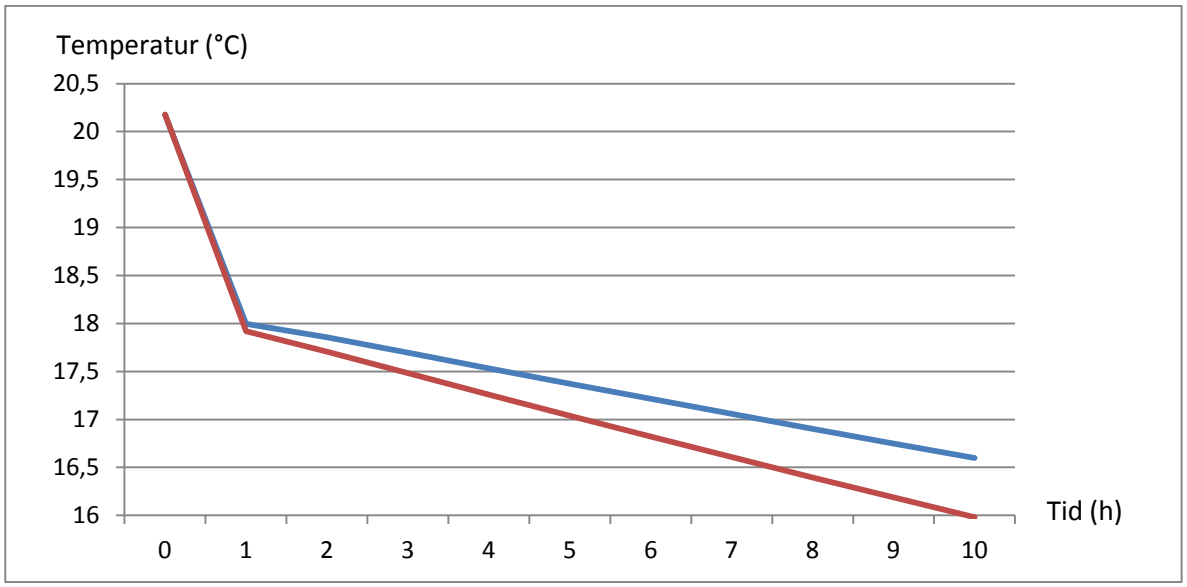
Förutom värmelagring i ytterväggar kan även innerväggar lagra värme. För att ta reda på inverkan av massiva betonginnerväggar, vilket är vanligt i flerbostadshus, genomfördes två simuleringar. I den första testades byggnaden med tung stomme och lätta innerväggar mot samma stomme fast med betonginnerväggar. I den andra simuleringen byttes också de lätta innerväggarna ut mot innerväggar av betong i den lätta stommen.

Figur 6. Den övre kurvan visar resultatet med betonginnerväggar och den undre gipsregelväggar i tung stomme.



Temperaturfallet är något lägre för stommen med betonginnerväggar (stomme 1), även om skillnaden är marginell. För den lättare stommen (stomme 2) har betonginnerväggarna desto större betydelse. Den stomlösningen uppvisar en signifikant skillnad i temperaturfall.

Figur 7. Den övre kurvan visar resultatet med betonginnerväggar och den undre kurvan visar gipsregelväggar i en lätt stomme.



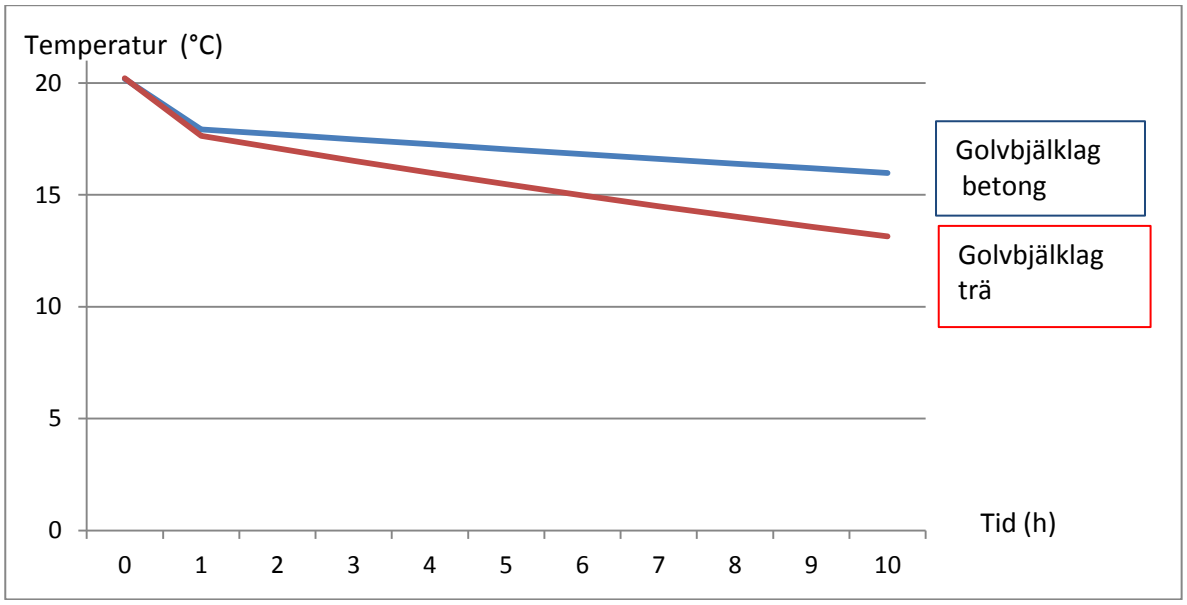
Den markanta skillnaden kan förklaras med att betongandelen av totala väggarean ökar från 0 till 40 %. Betong har bättre värmelagrande förmåga än

kombinationen gips, reglar och isolering och därför faller inte temperaturen lika hastigt.

4.1.6 Påverkan av golvkonstruktion

Hittills har alla simuleringar utgått från platta på mark av betong, men eftersom få byggnader har rena betonggolv utan beläggning kommer frågan naturligt om hur golvbeläggning påverkar. Programmet har inget färdigt golv med beläggning som motsvarar det som önskas simuleras. Läggs trägolv på betonggolvet blir inte betongytan exponerad vilket försämrar värmetrögheten men däremot leder trämaterialet. Kanske kan påverkan av golvbeläggningen approximeras som ett golvbjälklag som används vid krypgrund. Det valda bjälklaget består underifrån av spånskiva 20 mm, reglar och isolering 200 mm och trägolv 20 mm. U-värde, 0.185 W/ m^2·K, skiljer sig något från betongplattans 0.169 W/ m^2·K. Simuleringen utförs på den lätta stommen (stomme 2).

Figur 8 visar betydelsen av val av golvbjälklag i en lätt stomme.



Det framgår av diagrammet att lösningen med golvbjälklag innebär en väsentlig försämring av innetemperaturen. Lösningen bör således inte väljas.

4.2 Eventuella felkällor

De erhållna resultaten ska tolkas med försiktighet av olika skäl. Inledningsvis bygger resultatet på simuleringar, vilket är en modell som genom beräkning försöker återge en så korrekt bild av verkligheten som möjligt. För det andra bygger simuleringar på en rad val och förenklingar, se avsnitt 3.2.1, som alla sammantaget påverkar mätresultatet. För det tredje påverkar valet av indata resultatet. Om den undersökta byggnaden istället för att vara ett enplanshus istället hade varit en lägenhet, med samma areor, omgiven av likvärdiga lägenheter runt om, hade resultatet med största sannolikhet varit något annorlunda. Således ska resultatet endast tolkas generellt.

5 Diskussion och slutsatser

De utförda simuleringarna har en sak gemensamt och det är tidsförloppet efter det att värmetillförseln stängts av. Tio timmar motsvarar den tid som en normalarbetstagare spenderar på att arbeta och transportera sig från och till bostaden. Om arbetet utförs under dagtid, då energikrävande industrier är igång, kan värmen i bostaden kopplas på igen under kvällstid då energipriserna är lägre och industrier har producerat överskottsvärme. Detta förutsätter dock elmätning timme-för-timme som redan finns på olika håll i Sverige.

Skillnaden i temperaturvariation mellan en lätt och tung stomme efter tio timmar är betydande; 2.3°C respektive 4 °C. Ur komfortsynpunkt kan den lätta stomme uteslutas. Stommen med lättbetong och dubbelgips uppnår nästan samma resultat som den tunga stommen och skulle kunna väljas med hänsyn till ekonomi. Dock behöver även den högre uppvärmningskostnaden, för att kompensera temperaturskillnaden, tas med.

Den enskilt största faktor som påverkar inneklimatet är värmeövergångsmotståndet. Det är troligtvis även den faktor som är svårast att påverka. Inverkan av ökad ventilation i syfte att minska motståndet och lyckas behålla mer värme, får ställas mot ökade driftskostnader. För andra typer av byggnader såsom kontor och skolor skulle det ur komfortsynpunkt fungera mindre bra.

Vid nybyggnation av värmetröga stommar borde det vara tämligen lätt med dagens kunskap och teknik att få betydligt tätare än Boverkets nästan 20 år gamla rekommendationer. Visserligen medför en tätare byggnad ingen stor förbättring, men tillsammans med andra faktorer gör det skillnad.

Syftet med denna studie har varit att kartlägga de faktorer som påverkar värmelagringen. Slutsatsen är att den mest optimala byggnaden ur värmelagringssynpunkt består av betong; tak, grund samt inner- och ytterväggar. Dessutom är byggnadsdelarna välexponerade, släta och hopsatta så att byggnaden är så tät som möjligt. Med dessa åtgärder blir skillnaden efter värmen är avstängd 2.0°C efter tio timmar. Skulle starttemperaturen vara 21-22 °C skulle förmodligen inte komforten upplevas som dålig. Är dessutom en sänkning av värmeövergångsmotståndet möjlig blir skillnaden 1.0 °C under samma tidsperiod. Det är kanske fullt möjligt att det knappt blir någon temperaturskillnad om även solinstrålning beaktas. I tillägg skulle även en ökad isoleringstjocklek, från 200 mm till 300 mm för grunden påverka resultatet positivt, då golvarean utgör en stor del av byggnadens totalarea.

Sammanfattningsvis är stora energivinster möjliga om byggbranschen bygger fler värmetröga byggnader och om brukarna kan tolerera variationer i inomhusklimatet.

5.1 Fortsatta studier

Omfattning av detta kandidatarbete är tämligen begränsat och skulle kunna byggas ut med hur mycket solinstrålningen påverkar värmelagringen, men även hur personvärme och installationer påverkar. Ytterligare en aspekt värd att undersöka är hur vinden påverkar, då en lätt stomme kyls ut fortare än en tung stomme.

6 Källförteckning

6.1 Tryckt litteratur

[1] Skoglund, J. & Zeneli, M. (2011) *Passivhus med lättbetongstomme - Ett alternativ till passivhus med trästomme*. Lund: Media-Tryck.
[3] Avd. Energiteknik *Redogörelse Värmetransport* Luleå tekniska högskola Luleå
[4] Burström P.G. (2007) *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Lund: Studentlitteratur AB.
[5] Sandin, K. (2010) *Praktisk byggnadsfysik.* Lund: Studentlitteratur AB.
[6] Sandin, K. (1996) *Värme och fukt - kompendium i byggnadsfysik.* LTH Lund.
[7] Nevander L.E. & Elmarsson B. (1994) *Fukthandboken.* Mölnlycke: Elanders Sverige AB.
[8] Kurkinen, E-L W. (2012) Innerväggar av betong avger värme under natten. Husbyggaren nr 2 ss. 52-54.
[9] Ståhl, F. (2009). *Influence of thermal mass on the heating and cooling demands of a building unit.* Diss. Göteborg: Chalmers reproservice
[10] Karlsson, J. (2012). *Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut power consumption peaks and increase the thermal comfort.* Lic.-avh. Lunds tekniska högskola. Lund: LTH, Avd.f. Byggnadsmaterial. Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi.
[11] Forslund, J. (2010). *Bästa inneklimat till lägsta energikostnad.* Lund: Wallin och Dalholm Boktryckeri AB.
[12] Tammo, K. (2010) Energilagringen kan förbättras med andra material *Betongföreningen* nr 5 ss. 44-45.
[13] Herlin, A. & Johansson, G. (2011). *En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong*. Lund: Media-Tryck.
[14] Rönneblad, A. (2012). Trög betongstomme minskar energianvändningen och möjliggör fördröjning av effektuttag. *Bygg & Teknik* nr 7 ss. 53-56.
[16] Hagström, M. (2012). Klimatsmart betong i unikt projekt. *Betong* nr 6 ss. 27-29.
[20] Rönneblad, A., Forslund, J. & Andersson, R. (2011). Byt styrstrategi i miljonprogrammets fastigheter. *Samhällsbyggaren* nr 5 ss. 13-17.
[26] Warfvinge, C. & Dahlbom, M.(2010). *Projektering av VVS-installationer*. Lund: Studentlitteratur AB.

6.2 Elektroniska källor

[2] StruSoft Structual Design Software. VIP Energy 3 manual. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.vipenergy.net/Manual.htm> (2013-05-05).
[15] Strängbetong. *Så här funkar det: termodeck*. (Elektronisk). Tillgänglig: < http://www.strangbetong.se/konceptkomponenter/koncept/termodeck/sa-har-funkar-termodeck/> (2013-04-21).
[17] Esping, O. *Fråga Experten: Termiska ledningsförmågan i betong?* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://betong.se/2012/09/fraga-experten-termiskaledningsformagan-i-betong/> (2013-04-19)
[18] Wadsö, L., Karlsson, J. & Tammo, K. *Thermal properties of concrete with various aggregates* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.byggnadsmaterial.lth.se/fileadmin/byggnadsmaterial/Research/CERBOF/Thermal_properties__nr_10_.pdf> (2013-04-19).
[19] Isover. *Värmetröga byggnader 2-2011*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.byggnadsmaterial.lth.se/fileadmin/byggnadsmaterial/Education/pdf_doc/WORKSHOP/Isover-Varmetroga_byggnader_2-2011.pdf> (2013-04-21).
[22] Energimyndigheten. *Sveriges totala energianvändning,1970-2010, uttryckt i TWh samt slutlig energianvändningen inom sektorn bostäder och service,1970-2011, uttryckt i TWh*. (Elektronisk). Tillgänglig: http://www.energimyndigheten.se/Global/Statistik/Energil%c3%a4get/Energil%c3%a4get%20i%20siffror%202012.pdf> (2013-05-21).
[23] Betongforum.se. *Betong för energieffektiva byggnader - fördelarna med termisk massa* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://betong.addcms.se/admin/UploadFile.aspx?path=/UserUploadFiles/Energi_071019_sidor.pdf> (2013-04-24).
[24] Svensk betong. *Bygga med Prefab – rumsakustik*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.svenskbetong.se/ljud/rumsakustik.html> (2013-04-24).
[25] Persson, J. & Vogel, D. *Utnyttjande av byggnaders värmetröghet – utvärdering av kommersiella systemlösningar* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.byggnadsmaterial.lth.se/fileadmin/byggnadsmaterial/Research/CERBOF/Thermal_properties__nr_10_.pdf> (2013-05-01)
[27] Boverket *Otätheter*. . (Elektronisk).Tillgänglig: *<http://www.boverket.se/Sok/?q=0,8+l/s,+m2&adv=False&nh=10&defa=0&uaid=374EA07491AB33025912D3C41AC7A8D5:39302E3233302E31362E313331:5246736082724130683>* (2013-05-05).
[28] Svenska stenhusföreningen. *Lufttäthet*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.svenskastenhusforeningen.se/fakta/lufttaethet---energi.aspx> (2013-05-22).

6.3 Muntliga källor

[21] Eva-Lotta Kurkinen, Statens Provningsanstalt, 2013-05-15