



CHALMERS



# Implementering av nattsänkingsstrategier för energibesparingar i flerbostadshus

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik

JAKOB DALGREN  
KAIYU JULIA TAO

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK  
AVDELNINGEN FÖR BYGGNADSTEKNOLOGI

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2024



EXAMENSARBETE ACEX20

# Implementering av nattsänkingsstrategier för energibesparingar för flerbostadshus

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

JAKOB DALGREN

KAIYU JULIA TAO

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2024

Implementering av nattsänkingsstrategier för energibesparingar för flerbostadshus  
*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*  
*Samhällsbyggnadsteknik*

JAKOB DALGREN  
KAIYU JULIA TAO

© JAKOB DALGREN /KAIYU JULIA TAO, 2024

Handledare: Bijan Adl-Zarrabi, Avdelningen för byggnadsteknologi

Examinator: Bijan Adl-Zarrabi, Avdelningen för byggnadsteknologi

Examensarbete ACEX20  
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för byggnadsteknologi  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:  
Visualisering av flerbostadshus uppritat i Revit

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Göteborg 2024



Implementering av nattsänkingsstrategier för energibesparingar för flerbostadshus  
*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

JAKOB DALGREN

KAIYU JULIA TAO

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för byggnadsteknologi  
Chalmers tekniska högskola

## **SAMMANFATTNING**

Miljö- och klimatfrågor är viktigare än någonsin i dagens samhälle. En sektor som står för en stor andel av Sveriges totala energiförbrukning och samtidigt har stor förbättringspotential är bygg- och fastighetssektorn. Branschen står inför stora utmaningar inom området, där en viktig faktor är energieffektivisering av byggnader. Det kan uppnås på flera vis, men denna studie fokuserar på just nattsänkning av inomhustemperatur. Därmed är syftet att undersöka och utvärdera effektiviteten av nattsänkingsstrategier för att reducera energiförbrukningen i flerbostadshus, utan att försämra den termiska komforten.

Metoderna som används är förstudie, numerisk analys och analytiska beräkningar. Förstudien lägger grunden för förutsättningar i studien samt beskriver viktiga begrepp och kartlägger den tidigare forskningen. Vidare ger kombinationen av numerisk analys och analytiska beräkningar en bra helhetsbild av studieobjektet.

Resultatet från numerisk analys visar att den maximala energibesparingen för huset uppgår till cirka 1.02% för de olika nattsänkingsinställningarna under februari månad 2024. Samtidigt gav detta att drygt var tredje person är missnöjd med inneklimatet i den mest utsatta lägenheten. Resultatet från analytiska beräkningar visar att den mest utsatta lägenheten kunde spara cirka 3.4 % inom samma tidsperiod om den tilläggsisolerades och då reducerar U-värdet.

Sammanfattningsvis visar studien att metoden är tillämpbar för energibesparing. Mängden energi som sparas är proportionerlig med längden av nattsänkningen samt byggnadens tidskonstant (förmåga att lagra värme). Dock medför det en risk för ett högre effektbehov vid återuppvärmning och försämrad termisk komfort för de boende.

Det bör tilläggas att förhållandena i studien är mycket specifika vilket innebär att resultaten blir något begränsande.

Nyckelord: energieffektivisering, nattsänkning, värmetröghet, tidskonstant

# Implementation of Night Setback Strategies for Energy Savings in Multi-Family Housing

*Degree Project in the Engineering Programme  
Civil and Environmental Engineering*

JAKOB DALGREN

KAIYU JULIA TAO

Department of Architecture and Civil Engineering  
Division of Building Technology  
Chalmers University of Technology

## **ABSTRACT**

Environmental and climate issues are more important than ever in today's society. One sector that accounts for a large share of Sweden's total energy consumption and also has great potential for improvement is the building and real estate sector. The industry faces significant challenges in this area, with energy efficiency of buildings being a key factor. This can be achieved in various ways, but this study focuses specifically on night setback concerning indoor temperature. Therefore, the aim is to investigate and evaluate the effectiveness of night setback strategies for reducing energy consumption in multi-family houses, without causing discomfort.

The methods used include pre-study, numerical analysis, and analytical calculations. The pre-study lays the foundation for the study's assumptions, describes important concepts, and reviews previous research. Furthermore, the combination of numerical analysis and analytical calculations provides a comprehensive overview of the study object.

The results from the numerical analysis show that the maximum energy savings for the house amount to approximately 1.02% for the different night setback settings during February 2024. However, this also resulted in over a third of residents being dissatisfied with the indoor climate in the most exposed apartment. The results from the analytical calculations indicate that the most exposed apartment could save about 3.4% during the same period if it is additionally insulated, which reduces the U-value.

In conclusion, the study shows that the method is useful for energy savings. The amount of energy saved is proportional to the length of the night setback and the building's time constant (ability to store heat). However, it comes with the risk of higher power demand during reheating and a negative impact on the thermal comfort for the residents. It should be noted that the conditions in the study are highly specific, which means that the results are somewhat limiting.

Key words: Night setback, energy efficiency, time constant





# Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Frågeställningar	1
1.3 Syfte och målbild	1
1.4 Avgränsning	2
1.5 Metodik	2
1.5.1 Genomförande	2
1.5.2 Generativ AI	2
2 FÖRSTUDIE	3
2.1 Byggnadstekniska definitioner	3
2.2 Tidigare forskning	6
2.2.1 Byggnad som termisk energilagring	6
2.2.2 Temperatursänkning och effektbehov	7
3. NUMERISK ANALYS	9
3.1 Indata	9
4. ANALYTISKA BERÄKNINGAR	11
4.1 Indata	11
4.2 Matematiska ekvationer	12
5 RESULTAT	14
5.1 Numerisk analys	14
5.2 Analytiska beräkningar	17
6 DISKUSSION	20
6.1 Energibesparing och termisk komfort	20
6.2 Byggnadens värmetröghet	21
6.3 Metodanalys	21

7	SLUTSATSER	23
8	REFERENSER	24
	BILAGOR	26

# Förord

Detta examensarbete avslutar vår högskoleingenjörsutbildning inom samhällsbyggnadsteknik. Arbetet har genomförts under vårterminen 2024 på Chalmers Tekniska Högskola och skrivits för avdelningen för byggnadsteknologi.

Vi vill först och främst tacka vår handledare Bijan Adl-Zarrabi som varit mycket hjälpsam under arbetets gång. Hans vägledning och expertis har varit ovärderliga i processen att rikta och forma denna studie.

Ett ytterligare tack riktas till Fredrik Domhagen, doktorand på Chalmers, och Max Bergström på PEAB. Deras rådgivning och stöd inom datainsamlingen har gett oss värdefull information och inspiration om hur vi ska utforma vår studie.

Vi vill även tacka den kompetenta personalen på EQUA som har varit hjälpsamma i arbetet med dataprogrammet IDA ICE.

Göteborg maj 2024  
Jakob Dalgren  
Kaiyu Julia Tao

# Beteckningar

I detta avsnitt presenteras begrepp och variabler som används i rapporten.

## Begrepp

BBR - Boverkets byggregler

PMV - Predicted mean value

PPD - Predicted percentage of dissatisfied

## Variabler

$A$	Area ( $m^2$ )
$C$	Volymetriskt värmelagringskapacitet (J/K)
$c_p$	Specifik värmekapacitet (Ws/kgK)
$c_{pl}$	Luftens specifik värmekapacitet (J/kgK)
$E$	Energi (kWh)
$K$	Konduktans för värmefflöde (W/K)
$K_t$	Konduktans orsakad av transmission (W/K)
$K_v$	Konduktans orsakad av ventilation (W/K)
$n$	Luftomsättning (l/h)
$P$	Effekt (W)
$P_{iv}$	Internvärme (W)
$R$	Värmemotstånd ( $m^2K/W$ )
$R_{si}, R_{se}$	Värmeövergångsmotstånd ( $m^2K/W$ )
$T_{inne}$	Inomhustemperatur ( $^{\circ}C$ )
$T_{ute}$	Utetemperatur ( $^{\circ}C$ )
$t_c$	Tidskonstant (h)
$U$	Värmegenomgångskoefficient ( $W/m^2K$ )
$V$	Volym ( $m^3$ )
$\rho$	Densitet ( $Kg/m^3$ )
$\rho_l$	Luftens densitet ( $Kg/m^3$ )
$\lambda$	Värmeledningsförmåga/värmekonduktivitet (W/mK)

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Energi-och miljöaspekter är ett hett ämne i samhällsdebatten. En sektor som ofta nämns och därmed är en viktig faktor är bygg- och fastighetssektorn. Sektorn stod 2021 för 34% av Sveriges totala energiförbrukning, där uppvärmning är den huvudsakliga andelen (Boverket, 2024a).Sektorn står inför stora utmaningar gällande klimatomställning samtidigt som möjligheterna till energieffektivisering är stor.

För att nå de befintliga klimatmålen och främja ett mer hållbart energisystem förutsätts det att energieffektivisering av byggnader vidareutvecklas(Naturvårdsverket, 2023). Ett sätt att uppnå detta är genom tekniska åtgärder såsom förbättrad isolering samt effektivare installationer, till exempel ventilationssystem. Det finns många fler sätt att uppnå detta men denna studie fokuserar på nattsänkning av inomhustemperatur.

Kortfattat är nattsänkning en energibesparingsmetod där inomhustemperaturen sänks nattetid (Sasic Kalagasidis, 2019). När temperaturen sänks reduceras värmeenergibehovet och därmed sparas energi.

Vad gäller tidigare forskning finns studier som både finner nattsänkning lönsamt och icke lönsamt för byggnader med tung stomme. Vissa menar att metoden är användbar för att spara energi då värme effektivt lagras i stommen och strålas tillbaka till rummet under natten när värmeförseln är avstängd. Andra studier visar på att metoden är mer effektkrävande och därmed inte är lönsam som energieffektivisering. Eftersom resultaten från tidigare forskning skiljer sig åt, är ämnet intressant att undersöka.

## 1.2 Frågeställningar

- Hur mycket energi kan besparas genom nattsänkning utan att försämra god termisk komfort?
- Hur kan en byggnads värmetroghet utnyttjas för att optimera nattsänkingsstrategi?

## 1.3 Syfte och målbild

Syftet med detta examensarbete är att undersöka och utvärdera effektiviteten av nattsänkingsstrategier för att reducera energiförbrukningen i flerbostadshus.

Målbilden är att tillföra nya kunskaper och insikter och på så vis bidra till forskningen inom området.

## 1.4 Avgränsning

Rapporten avgränsas till att endast beröra de tekniska, miljömässiga och sociala aspekterna av nattsänkning. Det innebär att exempelvis ekonomiska faktorer inte tas hänsyn till även om det är en central fråga i praktiken.

Flerbostadshuset är beläget i Göteborg vilket innebär att studien avgränsas till just denna klimatzon. I studien styrs värmetillförsel samt andra reglerbara faktorer av en undercentral vilket innebär att de boende inte har möjlighet att själva reglera klimatanläggningen.

## 1.5 Metodik

För att besvara frågeställningarna tillämpades metoderna; förstudie, numerisk analys och analytiska beräkningar.

### 1.5.1 Genomförande

Arbetet inleds med en presentation av en förstudie där information hämtas från litteratur och rapporter som berör ämnet. Med hjälp av förstudien kan grundlig kunskap om nattsänkning erhållas för en djupare förståelse.

Vidare utförs en numerisk analys. Metoden syftar till att med datorprogram approximativt lösa olika matematiska problem (Ren, 2024). För att förtydliga kan metoden delas upp i tre delar. Pre-processing handlar om att samla in all nödvändiga data (input data) som behövs för att köra simuleringen (Oreilly, n.d.). Nästa del kallas processing. Programmet är inbyggt med en mängd olika ekvationer som beräknas automatiskt av datorn. Sista delen kallas post-processing. I denna del har ett resultat erhållits där rimligheten kritiskt behöver granskas.

Analytiska beräkningar används för att förbättra förståelsen av teoretiska kunskaper och för att jämföra resultat från datorbaserade simuleringar. Till skillnad från numerisk analys som görs för hela byggnaden kommer analytiska beräkningar att göras för en enskild lägenhet. Analytiska beräkningar kommer att utföras i Excel. Indata samlas in från den modell som används i den numeriska analysen och relevanta litteraturkällor. De matematiska ekvationer som tillämpas i dessa beräkningar är hämtade från litteraturen.

### 1.5.2 Generativ AI

I rapporten har generativ AI använts, närmare bestämt ChatGPT. Verktöget har använts för att förbättra strukturen i stycken, eliminera vissa grammatiska fel samt för en generell språkförbättring i texten. Syftet med att använda ChatGPT är att minska antalet småfel i texten och förbättra läsbarheten i rapporten.

## 2 Förstudie

Nedan följer en rad olika begreppsförklaringar som är viktiga för att förstå innehållet i rapporten. Även tidigare forskning kartläggs.

### 2.1 Byggnadstekniska definitioner

#### Energi och effekt

Energi är en fysikalisk storhet och definieras som kapaciteten att utföra arbete (Clean Technica, 2015). Det finns många olika enheter varav kWh kommer att användas i rapporten. Energi är alltså det totala arbetet utfört men säger inget om tiden det tar att utföra arbetet. Effekt beskriver hur snabbt ett arbete utförs och beräknas genom  $P = E/t$ , där P står för effekt (power), E energi, t tid.

Det innebär att den totala mängden energi som används vid nattsänkning är starkt beroende av hur snabb återuppvärmningen är då det krävs mer effekt för att arbeta snabbare och därmed ökat energibehov. Det är särskilt intressant då effektbrist eventuellt kan öka i framtiden genom omställningen mot mer osäkra förnyelsebara energikällor. Exempelvis kan mörka, kalla, vindstilla dagar skapa effektbrist då mängden energi som produceras i stunden är låg (Göteborg Energi, 2024).

#### Termisk komfort

En god termisk komfort innebär att man inte upplever obehag från kallras vid fönster, kalla golv eller känner sig allmänt för varm eller för kall. Enligt Boverkets byggregler (BBR) ska den lägsta lufttemperaturen i vistelsezoner vara 18 grader i bostadsrum och 20 grader i hygienrum för att säkerställa god termisk komfort (Boverket, 2024b).

För att upprätthålla en god termisk komfort brukar Fangers komfortindex tillämpas vilka innefattar PPD och PMV (Guenther, 2024).

PMV står för predicted mean value och fungerar som ett slags medelvärde som behandlar en grupp människors upplevda termiska känsla på en sju-gradig skala. Den inkluderar aspekter såsom innetemperatur, luftflöde och klädisolering. Perfekt inomhusklimat innebär 0 på den sju-gradiga skalan där -3 är för kallt och +3 är för varmt. För att klara standarderna ASHRAE 55 och ISO 7730 behöver PMV ligga inom intervallet -0.5-0.5 för nya byggnader.

PPD är en förkortning för predicted percentage of dissatisfied som syftar till att förutspå en procentsats över hur stor den förväntade diskomforten är i olika delar av en byggnad. Den innefattar aspekter såsom luftdrag, temperaturskillnader och golvtemperatur. Standard för PPD är max 20 %, alltså att 80 % är nöjda med inneklimatet.

## Klimatskärm

Klimatskärmen i en byggnad avser de delar som utgör gränsen mot utemiljön och bidrar till en behaglig och hälsosam inomhusmiljö. Denna skärm består av byggnadens yttre väggar, tak, fönster, dörrar och golv mot marken. Det finns flera funktionskrav på klimatskärmen, främst att den ska kunna hantera klimatbelastningar såsom regn, snö, vind och strålning. Klimatskärmen spelar även en avgörande roll i regleringen av inomhusklimatet genom att kontrollera värme-, luft- och fuktflöden in och ut ur byggnaden (Petersson, 2018, s. 25).

## Värmetransport

Värmetransport inom ett hus sker från delar med högre temperatur till delar med lägre temperatur. Det finns främst tre olika sätt att transportera värme: ledning, där temperaturskillnader utgör drivkraften; konvektion, som drivs av skillnader i lufttryck; samt strålning, där temperaturskillnader även här agerar som drivkraft (Petersson, 2018, s. 242).

Ledning innebär överföring av värme genom ett fast material utan att materialet självt förflyttar sig. Denna process kan även förekomma i gaser, både när de är i rörelse och när de är i stillhet. För att beräkna ett materialets förmåga att leda värme, används materialets värmeledningsförmåga ( $\lambda$ -värde). Ju lägre  $\lambda$ -värde materialet har, desto bättre isolerar det (Petersson, 2018, s. 242–244).

Konvektion är överföringen av värme genom rörelsen av vätskor och gaser. Denna process börjas när en gas eller vätska värms upp, vilket minskar dess densitet och får den att stiga. Samtidigt sjunker kallare gas eller vätska neråt. Detta skapar en cirkulerande rörelse. Ett exempel på värmetransporten genom konvektion är när luftläckage vid otäta fönster tillåter varm inomhusluft att fly till kallare delar inne i konstruktioner (Petersson, 2018, s. 257).

Strålning innebär överföring av värme genom vakuum, vilket innebär att ingen materia krävas för att föra över värmen. Ett vanligt exempel på detta är solljuset, där energi sänds från solen till jorden (Hagentoft & Sandin, 2017, s.50)

## Värmemotstånd

För att bestämma ett materialskikts förmåga att motstå värmeöverföring används värmemotståndet ( $R$ -värdet), vilket beräknas som kvoten mellan skiktets tjocklek och dess värmeledningsförmåga (Petersson, 2018, s. 244–245). Material med låg värmemotståndet kan leda till högre värmeförluster (Hagentoft & Sandin, 2017, s. 56).

Värmeöverföringen vid ytor på konstruktioner, som påverkas av konvektiv värmeöverföring med luften och strålning, kan beaktas med ett förenklat uttryck genom värmeövergångsmotstånd. Värmeövergångsmotståndet för innerytor i en väggkonstruktion, betecknat  $R_{\text{e}}$  som har ett värde på  $R_{\text{e}} = 0.13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$  För vägg- och

takkonstruktioners ytterytor används  $R_{\text{e}}$  som har ett värde på  $R_{\text{e}} = 0.04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

Värmeövergångsmotstånd påverkas av faktorer som lufttemperatur, strålningstal och



vindhastighet. Ju högre vindhastighet desto lägre  $R_{se}$ , vilket kan leda till högre värmeförluster (Petersson, 2018, s. 259–261).

### **Värmegenomgångskoefficient (U-värdet)**

Värmegenomgångskoefficient  $U$  ( $W/m^2K$ ) används för att uttrycka en byggnadsdels värmeisoleringsgrad. Det talar om hur mycket värme som passerar över byggnadsdelen per grad lufttemperaturskillnad. U-värdet beräknas som inversen av summan av alla de ingående skiktens värmemotstånd(R-värdet) samt värmeövergångsmotstånd. Ju högre U-värdet, desto större värmeförlust. (Petersson, 2018, s. 247).

### **Värmekapacitet**

Värmekapacitet beskriver mängden värmeenergi, uttryckt i joule, som krävs för att öka temperaturen hos ett material med en grad Celsius. Den volymetriska värmekapaciteten som har enheten  $J/m^3 K$  är produkten av materialets specifika värmekapacitet och dess densitet (Petersson, 2018, s. 145).

Den totala värmekapacitet  $C$  ( $J/K$ ) som beskriver materials värmelagningsförmåga är produktion av materialets specifika värmekapacitet och dess massan (Hagentoft & Sandin, 2017, s. 109).

### **Värmetröghet**

Värmetröghet avser byggkomponenters förmåga att lagra termisk energi. En byggnadsstomme kan fungera som ett värmelager, värme kan lagras i strukturen och släppas ut under kallare perioder. Material som är exponerade mot inneluften fungerar som en buffert som jämnar ut temperaturen över tid. Stommens värmekapacitet bidrar till termisk tröghet, vilket innebär att det tar tid för byggnadens inomhustemperatur att förändras. Ett lätt hus ger större temperaturvariationer under uppvärmning eller kylning jämfört med ett tungt hus. Ett tungt hus innebär att stommen är konstruerad av tunga material med hög värmekapacitet, såsom betong, tegel och sten. Den tunga stommens värmeomlagringseffekt bidrar till en stabil inomhustemperatur, vilket är fördelaktigt för komfort och energieffektivitet. Dock kan denna egenskap vara en nackdel om byggnaden behöver värmas upp snabbt. Mått på en byggnads värmetröghet kan beräknas med dess tidskonstant(Hagentoft & Sandin, 2017, s. 99-109).

### **Tidskonstant**

Tidskonstanten, som vanligtvis räknas i timmar, är ett mått på byggnadens värmetröghet. Den beräknas som kvoten mellan summan av byggnadsdelarnas värmekapacitet och summan av värmeeffektörlusterna. Dessa förluster inkluderar värmeförlust vid värmetransport genom klimatskärmen, förluster orsakade av ventilationssystem, och luftläckage från otillräcklig tätning kring klimatskärmen (Petersson, 2018, s. 82).

Byggnader som är uppbyggda med tunga material och har hög värmekapacitet är värmetröga och karakteriseras av en högre tidskonstant. Detta innebär att dessa byggnader tar längre tid att svara på temperaturförändringar på grund av sin förmåga att lagra mer värmen i stommen. Lätta byggnader med lägre tidskonstant betyder att byggnaden påverkas relativt snabbt av temperaturförändring (Petersson, 2018, s. 82).

## **Nattsänkning**

Nattsänkning, night setback, är en effektiv strategi för att reducera energiförbrukningen för uppvärmning under nattetid och samtidigt begränsa effektoppar vid återuppvärmning. Strategin innebär att värmeförseln helt eller delvis kopplas av, vilket sänker inomhustemperaturen några grader under natten. Innetemperaturen sjunker till en förutbestämd nivå, därefter återställs värmen för att upprätthålla innetemperaturen på komfortkrav. Nattsänkning kan resultera i en minskning av energiförbrukningen, dock medför detta ofta ett betydligt större effektbehov för återuppvärmning av utrymmena (Sasic Kalagasidis, 2019).

Effektiviteten av nattsänkning som en energibesparingsåtgärd beror i stor utsträckning på uppvärmningssystemet. I Sverige står fjärrvärme för 89 % av energiförbrukningen för uppvärmning och tappvarmvatten i flerbostadshus. Under höglastperioder ökar behovet av fossila bränslen, vilket kan leda till höga koldioxidutsläpp. För att optimera fjärrvärmesystem är det viktigt att hålla systemets effektbehov lågt. Byggnadens termiska tröghet kan utnyttjas för att undvika för höga effektbehov och att minska användningen av fossila bränslen. Genom att sänka innetemperaturen med cirka 0,5 grader några timmar före ett förväntat högt effektbehov i systemet, och sedan öka temperaturen under perioder av lågt effektbehov, kan effektbehovet reduceras utan att det påverkar den termiska komforten. Denna metod tillämpas bland annat av Göteborg Energi (Sasic Kalagasidis, 2019).

## **2.2 Tidigare forskning**

Nedan presenteras tidigare studier om byggnaders värmetröghet och nattsänkning.

### **2.2.1 Byggnad som termisk energilagring**

I artikeln "*Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test*" diskuterade författarna byggnaders termiska tröghet som kan utnyttjas i flerbostadshus. Denna studie presenterade resultat från ett pilotförsök där fem flerfamiljshus i Göteborg undersöktes för sin potential att fungera som termisk energilagring. Resultaten visade att tunga byggnader kunde hantera relativt stora variationer i värmeflöden samtidigt som de bibehöll ett gott inomhusklimat.

Studien visade även att en fast tidskonstant inte var tillräckligt noggrann för att beskriva variationer i inomhustemperaturen orsakade av användningen av byggnader som korttids termisk energilagring. När ett rum värmdes upp överförde radiatorerna värme till de fasta materialen genom strålning och till inomhusluften genom ledning och konvektion. Om tillförseltemperaturen till radiatoren ändrades, genomgick inomhusluften initialt en snabbare temperaturförändring än de fasta materialen. Detta

berodde på att inomhusluften hade lägre termisk massa än de fasta materialen, och en stor del av radiatorernas värmeöverföring skedde direkt till luften. När temperaturen i inomhusluften hade stabiliserats skedde en värmeöverföring till de fasta materialen, vilket saktade ner temperaturförändringen i luften. Dessutom nådde inte temperaturen snabbt in i de djupare delarna av dessa material, eftersom deras ytor värmdes upp eller kylades ned innan värmen trängde djupare in. Dessa faktorer förklarade varför en fast tidskonstant inte var tillräcklig för att bygga en modell som beskriver sambandet mellan utomhus- och inomhustemperatur under kortare perioder som mindre än 9 timmar efter en temperaturändring. En fast tidskonstant kunde dock vara mer tillförlitlig över längre perioder, då temperaturen mellan inomhusluften och de fasta materialen hann stabiliseras (Kensby et al., 2015).

I artikeln "*A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures*" diskuterades en konceptuell modell för att undersöka effekterna av att öka den termiska lagringskapaciteten hos byggmaterial. Studien undersökte värdet av termisk massa i kalla klimat där byggnader uppvärmdes under större delen av året och där en betydande del av värmeförlusterna skedde genom värmeledning. Forskningen inkluderade värmeförluster genom klimatskärmen men bortsåg från ventilation, eftersom moderna ventilationssystem med värmeväxlare hade minskat dessa förluster avsevärt. Resultaten visade att termisk tröghet inte alltid erbjuder betydande energibesparingar, speciellt inte vid intermittenta uppvärmningsstrategier där det som sparades under en period ungefär förlorades när mer värme krävdes inför byggnadens användning.

Trots att hög intern värmekapacitet kan erbjuda vissa fördelar, kan det ekonomiskt vara utmanande att lägga till termiskt tunga byggkomponenter enbart för att öka tidskonstanten i en byggnad (Karlsson et al., 2013).

## 2.2.2 **Temperatursänkning och effektbehov**

I fallstudien "Mapping the Heating Storage Capacity in a Multifamily Building within a District Heating Network in Mid-Sweden" visade att byggnadens termiska massa kunde användas för att lagra värme under perioder av lägre efterfrågan, vilket minskade behovet av ytterligare uppvärmning under höglastperioder. Genom att tillfälligt sänka inomhustemperaturen i huset, som hade en relativt lång tidskonstant, uppskattades energitillförseln minska med 61% under en femtimmarsperiod, vilket resulterade i endast en temperaturminskning på 0,3°C (Hayati et al., 2022).

I studien "*Night setback identification of district heat substations using bidirectional long short term memory with attention mechanism*" diskuterade författarna nattsänkning som en metod för energibesparing. Nattsänkning är en metod där temperaturen inomhus sänktes under natten för att minska energiförbrukningen. När nattsänkingsinställningen implementerades sänktes effektbehovet av fjärrvärmesystemet under kvällen på grund av temperaturjusteringar, och en kraftig ökning skedde på morgonen när byggnaden behövde värmas upp till önskad temperatur. Trots att nattsänkningen tillämpades, minskade inte nödvändigtvis byggnadens totala värmeanvändning. Den tidigare tanken var att sänkta inomhustemperaturer under natten skulle minska den genomsnittliga

inomhustemperaturen och därmed det totala värmebehovet. Dock, eftersom de flesta byggnader hade höga tidskonstanter, skedde minskningen av inomhustemperaturen långsamt och medförde endast små förändringar i genomsnittstemperatur och värmebehov. Således resulterade användningen av nattsänkning i dessa byggnader i att en del av värmebelastningen förflyttades från kvällen till morgonen (Zhang et al., 2021).

### 3. Numerisk analys

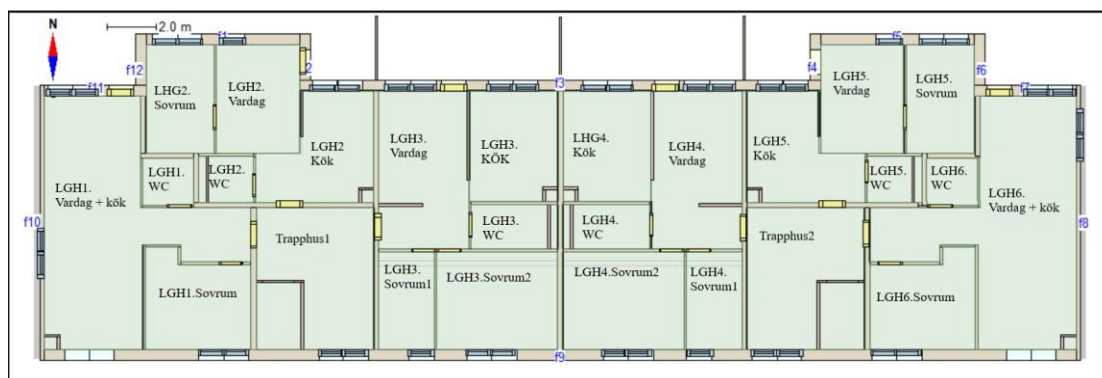
I detta avsnitt behandlas pre-process delen av den numeriska analysen som utförts med dataprogrammet IDA ICE

#### 3.1 Indata

Nedan presenteras all nödvändig input data som använts för att köra datasimuleringarna.

##### Geometriska modellen

En färdig datamodell av ett flerbostadshus importerades via IFC-fil in till simuleringsprogrammet. Från den filen erhålls viktiga data såsom areor, volymer och övriga mått av flerbostadshuset samt en mall av planlösningarna. Från detta skapades zoner för alla rum på alla plan. Planlösning samt zonernas namn illustreras i Figur 1.



Figur 1: Planlösning

##### Materialdata

Klimatskärmens uppbyggnad och materialval i studien har noga valts ut för att i största grad representera en riktig nybyggnation. Byggnadens uppbyggnad har hämtats från litteraturer "Så byggdes husen 1880-2020" och "Arkitektens handbok". Egenskap av byggnadens material hämtats från litteratur "Tillämpad byggnadsfysik". Lagerföljden, tjocklekar och byggnadstekniska egenskaper presenteras i Bilaga 1.

##### Initialdata

Simuleringarna utgår från att huset är förvärm. Det innebär att den initiala innetemperaturen redan är uppe i den önskade temperaturen. Det innebär också att en viss mängd värme redan finns lagrad i stommen.

##### Belastningar

Hit hör faktorer som inte kan kontrolleras.

De interna värmelasterna beskrivs av simuleringsprogrammet som belysning, elektronisk utrustning och personvärme. Vad gäller belysning och elektronisk

utrustning är internvärmerna så pass låg för flerbostadshus att dessa parametrar försummas i beräkningarna.

Personvärme har definierats som utrymmen där personer spenderar merparten av sin tid, i detta fall vardagsrum och sovrum. Det innebär att utrymmen som exempelvis WC, kök och övriga lager/trapp-utrymmen inte bidrar med internvärme. Tiden personerna vistas i rummen beskrivs av ett förinställt schema (house living example), vilket antas vara klockan 17–08 på vardagar samt alla timmar på dygnet vid helgdagar. Personerna avger 80 W enligt Sveby rekommendationer (Sveby, 2012a).

Eftersom flerbostadshuset ska representera en nybyggnation har alla köldbryggor antagits vara goda. Det påverkar energiförlusterna genom infiltration.

Klimatdata som använts baseras på programmets egen klimatfil över Göteborg. Filen består av diverse väderdata som baseras på mätningar från SMHI-Sveby (EQUA, 2024).

Vidare har faktorer som orientering och skuggning valts att försummas och därmed inte ställas in i simuleringsprogrammet.

## **Randvillkor**

Hit hör faktorer som kan kontrolleras genom styr- och reglerteknik. Byggnaden består av CAV-system vilket innebär att luftflödet är konstant i byggnaden. Frånluften har ställts in till  $0.35 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  i alla zoner vilket är minivärdet enligt Folkhälsomyndigheten (Folkhälsomyndigheten, 2023).

Tilluften har också ställts in till  $0.35 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  och verkar i de zoner där personer förväntas vistas en längre period. Det innebär att utrymmen som WC och lager/trapputrymmen inte har tilluft.

Värmesystemet består av vattenburna radiatorer som är kopplade till ett fjärrvärmesystem. Eftersom simuleringen sker i februari kommer kylbehovet vara obefintligt, därav har kylsystem exkluderats i byggnaden. Tappvarmvattnet har ställts in till  $25 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{år}$  enligt Sveby rekommendationer (Sveby, 2012a).

Vidare hålls en innetemperatur på 21 grader där människor vistas oftare samt i våtutrymmen. Denna temperatur ligger inom det intervall som krävs enligt Folkhälsomyndighetens riktlinjer och är en vanlig branschstandard (Socialstyrelsen, 2005). Trapp-och lagerutrymmen har en innetemperatur på 18 grader. Vid nattsänkningen sänks innetemperaturen med 5 grader för sovrum, kök och vardagsrum för de numeriska beräkningarna.

## 4. Analytiska beräkningar

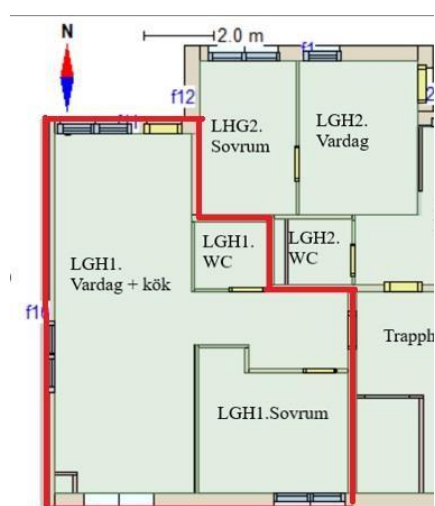
I detta kapitel redovisas vilka indata som har använts och vilka beräkningar som har utförts i Excel. Till skillnad från den numeriska analysen som utförs för hela byggnaden, kommer analytiska beräkningar att göras för en enskild lägenhet i byggnaden. Genom att beräkna hur snabbt en byggnad reagerar på temperaturförändringar kan man planera när och hur mycket värme som behövs för att upprätthålla god komfort. Beräkningarna görs först med indata som hämtats från IDA-simuleringar och därefter görs beräkningar med BBR:s standard U-värdet för klimatskärmen.

### 4.1 Indata

Indata som beräkningarna bygger på har hämtats från datasimuleringar, relativa rapporter och myndigheter.

#### Geometriska modellen

Den valda lägenheten (lägenhet 1) är en av de största, med en yta på  $69 m^2$ . Lägenheten är placerad vid sidan av byggnaden och har den största fasadytan samt fönsterytan jämfört med de andra lägenheterna, vilket resulterar i de största värmeförlusterna genom transmission.



Figur 2: Planritning

Tabell 1: Area A ( $m^2$ ) för olika byggnadsdelarna i lägenhet 1

Fasad	Tak/Golv	Dörr	Fönster
44.55	69	4.26	11.70

#### Material data

För att undersöka byggnadens värmetröghet under olika förhållanden har beräkningarna utförts för två olika fall. Beräkningar utfördes först med materialdata som hämtats ur IDA-simulering. Därefter utfördes beräkningar med U-värde som har hämtats från Boverkets byggregler.

Tabell 2: Värmemotståndet  $U$  ( $W/m^2K$ ) för olika byggnadsdelarna

	Fasad	Tak/Golv	Dörr	Fönster
Fall 1 (IDA)	0.14	1.64	1.50	1.40
Fall 2 (BBR)	0.18	0.15	1.20	1.20

### Initialdata

Den initiala innetemperaturen antas redan vara uppe i den önskade temperaturen. Det innebär att en viss mängd värme redan finns lagrad i stommen.

### Belastning

Vid beräkningarna används klimatdata och internlasten i lägenheterna som baseras på data från Sveby. Intervärmen är beräknad till 80 W per person, och det antas att det bor två personer i lägenheten. Beräkningarna genomförs för den kallaste dagen i februari 2009, då den högsta temperaturen var -6,7 grader och den lägsta -15,2 grader. Till skillnad från IDA-simuleringar, som använder varierande utetemperaturer, har analytiska beräkningar utförts med en medelutetemperatur. (Sveby, 2012b).

### Randvillkor

Vid analytiska beräkningar inkluderas inte luftläckage i beräkningarna av värmeförluster. Luftomsättning har antagits vara  $0.5 h^{-1}$ . I både fallen har det antagits att lägenhetens totala värmekapacitet är konstant, vilket innebär att den effektiva termiska massan som kan lagra värme i byggnaden är densamma oberoende av isoleringsnivå. Detta trots att termisk isolering förbättras i det andra fallet.

## 4.2 Matematiska ekvationer

Nedan presenteras de matematiska ekvationer som används för analytiska beräkningar.

### Tidskonstant

Tidskonstanten  $t_c$  (s) kan beräknas som kvoten mellan den effektiva delen av en byggnads termisk massa och värmeeffektförlusterna:

$$t_c = \frac{C}{K_t + K_v} \quad (s)$$

där  $C$  (J/K) är den totala värmekapacitet av materialet som beräknas med  $C = \rho * c_p * V$ . Här är  $\rho$  ( $Kg/m^3$ ) materialets densitet,  $c_p$  (J/kgK) är dess specifika värmekapacitet och  $V$  ( $m^3$ ) är byggnadsdelarnas effektiva volym innanför värmeisoleringen.

$K_t$  (W/K) är konduktansen som är transmissionsförlusterna av klimatskärmen och beräknas med  $K_t = U * A$ . Här är  $U$  ( $W/m^2K$ ) värmegenomgångskoefficient och  $A$  är klimatskärmens arean.



$K_v$  (W/K) är värmeeffektförlusterna orsakade av ventilation som beräknas med  $K_v = \rho_l * c_{pl} * n * V$ . I detta fall är  $V$  (m<sup>3</sup>) lägenhetens volym,  $\rho_l$  (Kg/m<sup>3</sup>) är luftens densitet,  $c_{pl}$  (J/kgK) luftens specifik värmekapacitet och  $n$  (1/h) är luftomsättning (Hagentoft & Sandin, 2017, s. 109).

## Innetemperatur

Den frigående inomhustemperatur när nattsänkning börjar beräknas enligt ekvation:

$$T_{inne.frigående}(t) = T_{inne.jämvikt} * (1 - e^{-\frac{t}{t_c}}) + T_{inne.börvärde} * e^{-\frac{t}{t_c}}$$

Där  $T_{inne.jämvikt}$  är innetemperatur när uppvärmningen har avstängts under en längre tid i byggnaden som beräknas med  $T_{inne.jämvikt} = T_{ute} + \frac{P_{iv}}{K_t + K_v}$ , här är  $P_{iv}$  (W) internvärme.

$T_{inne.börvärde}$  är innetemperatur innan nattsänkning börjas det vill säga 21 grader.  $t$  är tiden under natten då värmen är avstängd.  $t_c$  är tidskonstant (Sasic Kalagasidis, 2019).

## Effektbehov och energibehov

Värmeeffekt som behövs vid en kontinuerlig uppvärmning beräknas enligt ekvation:

$$P_{upp_kontinuerlig} = (K_t + K_v) * (T_{inne.börvärde} - T_{ute}) \quad (w)$$

Värmeeffekt som behövs för att värma upp lägenheten till 21 grader på en begränsad tid beräknas enligt ekvation:

$$P_{upp_kontinuerli}(t) = \frac{(K_t + K_v)}{1 - e^{-\frac{t}{t_c}}} * (21 - (T_{inne.jämvikt} + (T_{inne.värme.på} - T_{inne.jämvikt}) * e^{-\frac{t}{t_c}})) \quad (w)$$

Här är  $t$  tiden för återuppvärmning och  $T_{inne.värme.på}$  är temperatur när värmen kopplas på igen (Sasic Kalagasidis, 2019).

För att beräkna hur mycket energi som krävs för att värma lägenheten används ekvation:

$$E = P * t \text{ (kWh)}$$

Här är  $t$  tiden för uppvärmning och  $P$  är värmeeffekt (Sasic Kalagasidis, 2019).

## 5 Resultat

I detta kapitel presenteras resultaten från numerisk analys och analytiska beräkningar.

### 5.1 Numerisk analys

Resultatet från den numeriska analysen delas upp i två delar: energisimuleringar och termisk komfort. De olika inställningarna som kördes i simuleringsprogrammet illustreras i tabell 3.

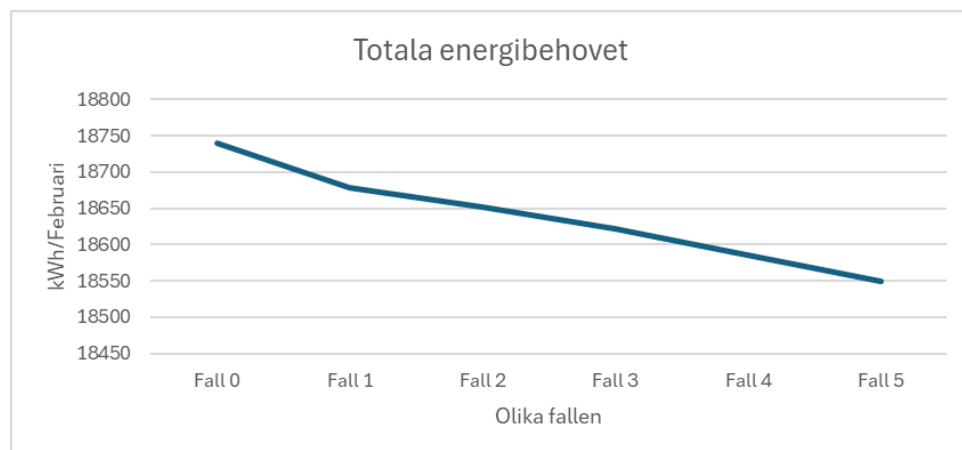
Tabell 3: Inställningar för nattsänkningen

Inställningar	Aktiv nattsänkning
Fall 0	Ingen nattsänkning
Fall 1	22:00-02:00
Fall 2	22:00-03:00
Fall 3	22:00-04:00
Fall 4	22:00-05:00
Fall 5	22:00-06:00

### Energisimuleringar

Resultatet av simuleringarna tydliggör att implementering av nattsänkning minskar det totala energibehovet för flerbostadshuset. Reduktionen av energibehovet sker också i en relativt linjär korrelation med längden på nattsänkningen, vilket framgår i Figur. Den huvudsakliga parametern som påverkas i resultaten är behovet av fjärrvärme vilken reduceras med ca 1.05% vid den mest omfattande nattsänkningensinställningen, fall 5. Resterande energibehov består primärt av elanvändning som går till exempelvis lampor, fläktar och andra elektroniska system. Denna faktor är konstant och uppgick till 605.9 kWh för februari.

Med dessa inställningar kan den maximala energibesparingen uppgå till 191 kWh vilket motsvarar ungefär 1.02 %. Resterande resultat redovisas i tabell 4.



Figur3: Diagram över totala energibehovet vid de olika fallen.

Tabell 4: Resultat från simuleringarna

	Fall 0	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Totala energibehovet [kWh]	18740.3	18679	18652.2	18621.3	18586.1	18549.3
Procentuell minskning [%]	0	0.33	0.47	0.63	0.82	1.02
Fjärrvärme [kWh]	18134	18073	18046	18015	17980	17943
Procentuell minskning [%]	0	0.34	0.49	0.66	0.85	1.05

## Termisk komfort

Vid sänkning av temperaturen är det också mycket viktigt att ta hänsyn till den termiska komforten och hur människor upplever det. För att analysera detta används Fangers komfortindex, eller PPD och PMV med andra ord. För att tilläga används här den extremaste inställningen för nattsänkning Fall 5.

Simuleringen visar att de mest utsatta zonerna är Vardagsrum + kök på både plan 1 och plan 3, där den maximala diskomforten (max PPD) uppgår till 34.96%, se Bilaga 2. Dessa zoner utmärker sig särskilt där människor är mest missnöjda med den termiska komforten. Därefter kommer en blandning av plan 1 och 3 där generellt sett större zoner som har mer kontakt med uteklimatet upplever större diskomfort. De zonerna med bäst komfort ligger generellt på plan 2 där komforten ökar desto mindre zonerna är. Resultatet för fall 5 skiljer sig en hel del från fall 0 där den maximala diskomforten uppgår till 17.24%. Kompletta tabeller över alla zoner för fall 5 och fall 0 återfinns i Bilaga 2 och Bilaga 3.

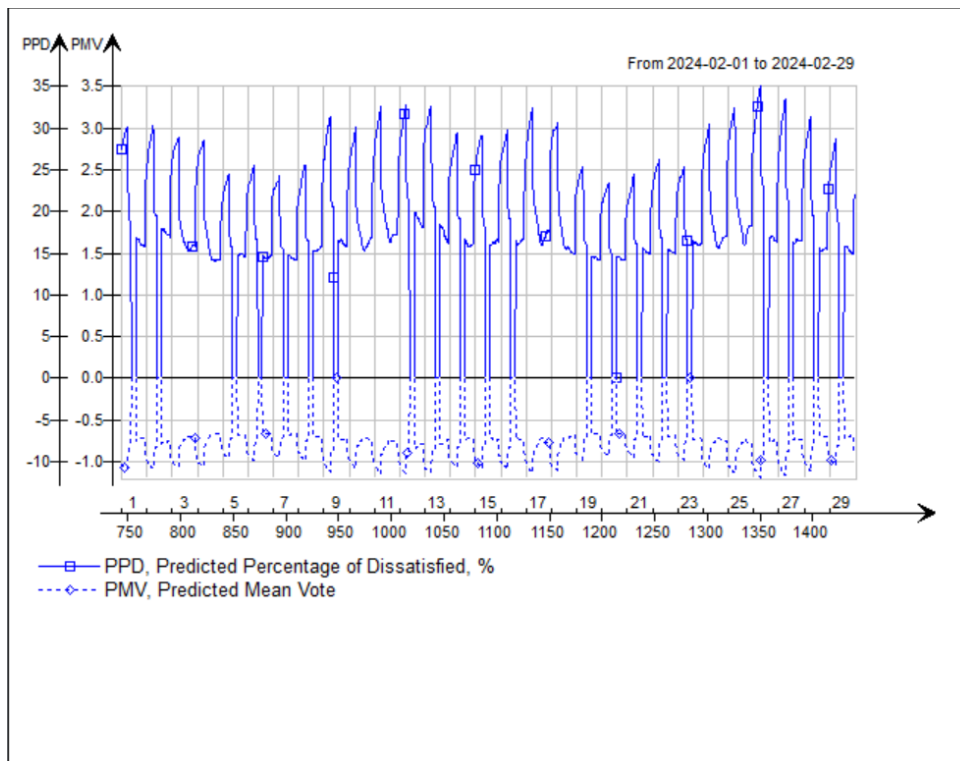
Den maximala erhållna PMV beräknades till  $-1,1964$  för fall 5, se tabell 5, och hade under hela månaden ett medelvärde på  $-0,783$ . För fall 0 beräknades maximala PMV till  $-0,76914$ , se tabell 6, och gav under månaden ett medelvärde på cirka  $-0,5883$ . Resultat från de fem lägsta PMV för båda fallen presenteras i tabellerna 5 och 6. Simuleringen gav 3418 rader i Excel varpå hela tabellen inte kan inkluderas. En övergripande illustration av PPD och PMV för hela månaden i zonen 1.LGH1.Vardag + kök går att utläsa från figur 4.

Tabell 5: Fem lägsta PMV, fall 5

Time	PMV, Predicted Mean Vote
1350.021	-1.1964
1350.017	-1.1963
1350.009	-1.1962
1350	-1.196
1349.881	-1.1936

Tabell 6: Fem lägsta PMV, fall 0

Time	PMV, Predicted Mean Vote
1357.887	-0.76914
1357.984	-0.76834
1358.178	-0.76801
1022.103	-0.76749
1358.514	-0.7665



Figur 4: PPD & PMV för mest utsatta lägenheten

## 5.2 Analytiska beräkningar

De analytiska beräkningarna för att bestämma byggnadens värmetröghet och dess inverkan på temperaturförändring inomhus har utförts med hjälp av Excel. Resultaten av dessa beräkningar presenteras nedan, där två olika fall av byggnadens termiska isolering varierades.

### Tidskonstant

$$t_c = \frac{C}{K_t + K_v}$$

Tabell 7: Resultat av lägenhetens tidskonstant

	C (J/K)	$K_t$ (W/K)	$K_v$ (W/K)	$t_c$ (h)
Fall 1	18532593.57	142.17	31.05	30
Fall 2	18532593.57	37.52	31.05	75

För det första fallet användes samma materialdata som i den numeriska analysen. Beräkningarna visar att tidskonstanten för lägenheten, med avseende på den största fasadytan, är 30 timmar. Denna tidskonstant reflekterar den tid det tar för byggnaden att nå ett nytt termiskt jämviktstillstånd efter en temperaturändring.

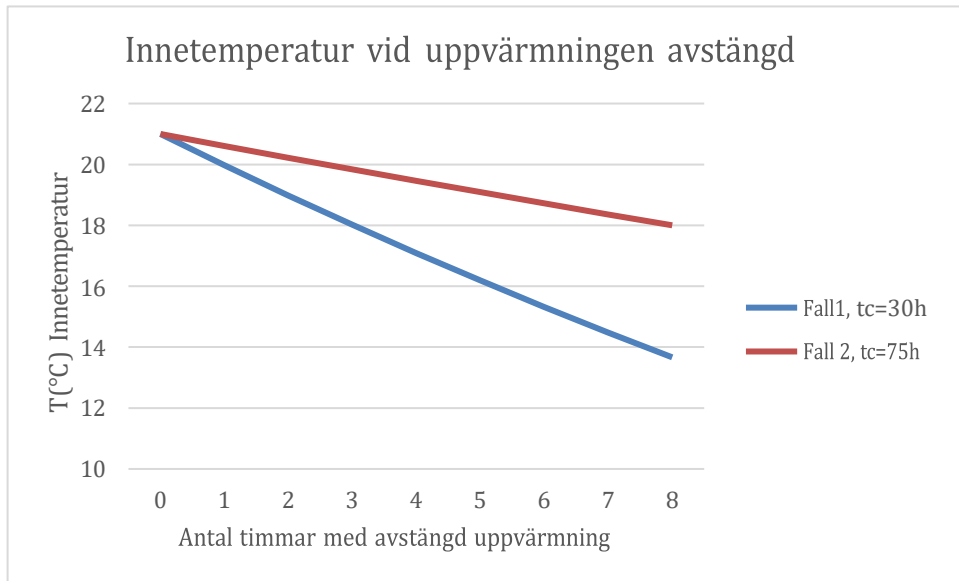
I det andra fallet förbättrades U-värdet på byggnadsdelen, medan den totala värmekapaciteten bibehölls som i fallet 1. Denna ökning av termisk isolering resulterade i en minskning av värmeförlusterna (K-värdet) genom klimatskärmen. Tidkonstant för lägenheten räknades till 75 timmar vilket är en betydande ökning jämfört med det första fallet.

### Innetemperatur

$$T_{inne.frigående}(t) = T_{inne.jämvikt} * (1 - e^{-\frac{t}{t_c}}) + T_{inne.börvärde} * e^{-\frac{t}{t_c}}$$

Tabell 8: Resultat av innetemperatur  $T_{(inne.frigående)}(t)$  vid uppvärmningen avstängd

Tid	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fall 1	21.00	19.97	18.98	18.02	17.09	16.19	15.32	14.48	13.67
Fall 2	21.00	20.61	20.22	19.84	19.46	19.09	18.72	18.36	18.00

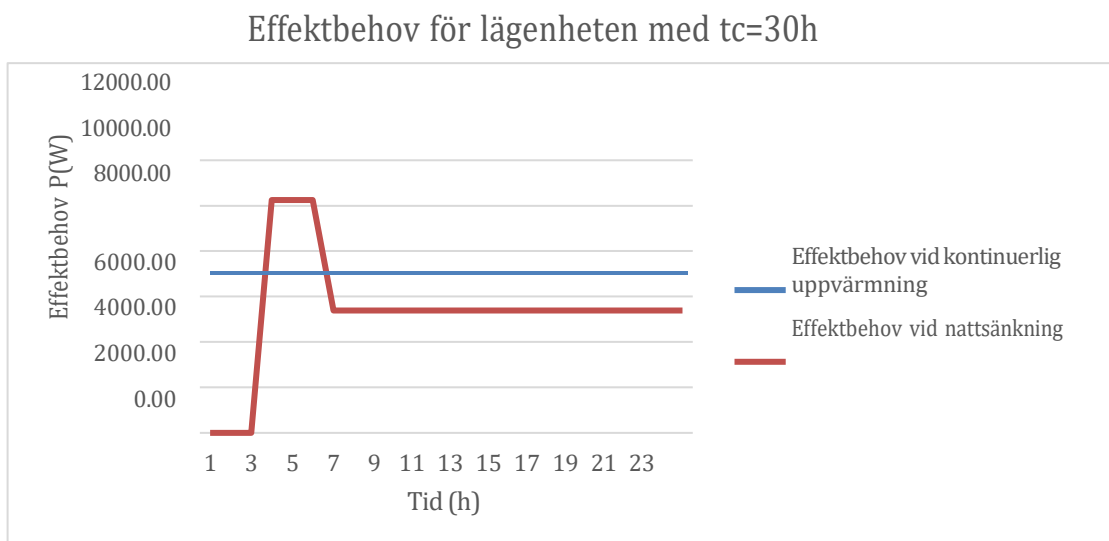


Figur 5: Innetemperatur vid uppvärmningen avstängd

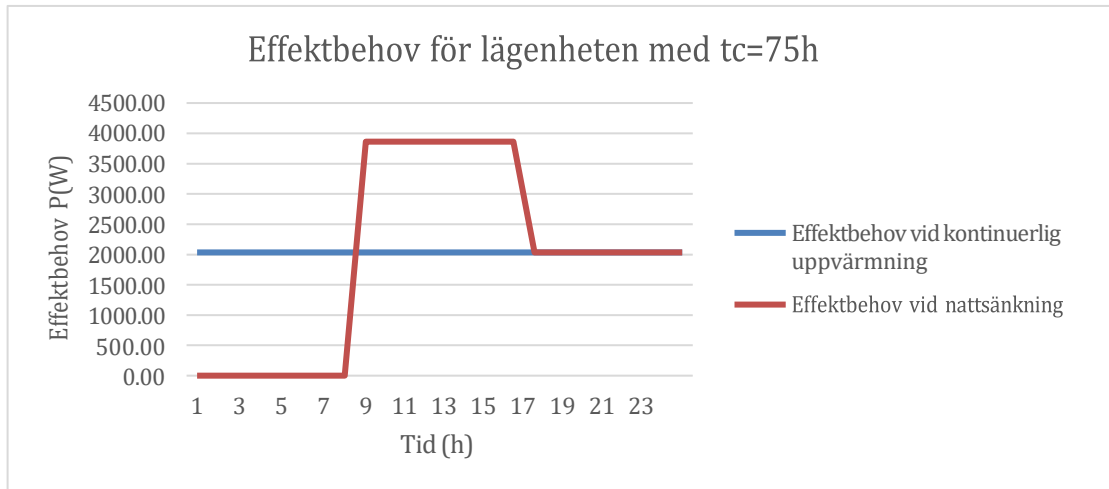
Beräkningarna visar hur olika byggnadskonstruktioners termiska egenskaper, som representeras av deras tidskonstanter, påverkar deras förmåga att bibehålla innetemperaturer efter uppvärmning avkopplas.

För lägenheten med en tidskonstant på 30 timmar observerades att temperaturen sjönk från 21°C till 18°C i 3 timmar efter värmen stängdes av. Fall 2 visar en byggnad med ett bättre U-värde och en längre tidskonstant på 75 timmar, innetemperatur sjönk långsammare och det tog ungefär 8 timmar för att nå 18 °C.

## Effektbehov och energibehov



Figur 6: Effektbehov för lägenheten med tidskonstant=30h



Figur 7: Effektbehov för lägenheten med tidskonstant=75h

Tabell 9: Resultat av energibehov

	Energibehov under 24h utan nattsänkning	Energibehov under 24h med nattsänkning	Energibesparing
Fall 1, tc=30h	3100 kWh	3063 kWh	1.2%
Fall 2, tc=75h	1172 kWh	1132 kWh	3.4%

Resultaten av effektbehovet, som visas i figur 6 och 7, visar att båda fallen har relativt höga effektbehov under återuppvärmning. För att värma upp lägenheten från 18°C till 21°C efter nattsänkning krävs det ungefär dubbelt så högt effektbehov jämfört med kontinuerlig uppvärmning.

Resultaten av energibehov för 24 timmar visas i tabell 9. För byggnaden med en tidskonstant på 30 timmar, är energibehovet ungefär tre gånger högre än för byggnaden med en tidskonstant på 75 timmar. När en nattsänkingsstrategi implementeras i fallet 1, där temperaturen sänks i tre timmar följt av uppvärmning i tre timmar, resulterar detta i en energibesparing på cirka 1,2 %. När en nattsänkingsstrategi implementeras i fallet 2, där temperaturen sänks i åtta timmar följt av uppvärmning i åtta timmar, resulterar detta i en energibesparing på cirka 3,4 %.

## 6 Diskussion

I detta kapitel diskuteras de erhållna resultaten från numeriska analysen samt analytiska beräkningar. Resultaten från denna studie kommer att jämföras med tidigare forskning inom det aktuella området. Utifrån detta kommer slutsatser kunna dras och även en diskussion kring metodernas genomförande samt dess felkällor kunna erhållas.

### 6.1 Energibesparing och termisk komfort

Utav de olika inställningarna för nattsänkning i datasimuleringen presterade den mest extrema sänkningen bäst. Något som är intressant med resultaten är att variationerna mellan inställningarna är mycket små och att den totala mängden sparad energi låg. Detta resultat korrelerar väl till studien "*A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures*" vilket nämns i tidigare forskning. Något som även är intressant att diskutera är den linjära reduceringen av energibehovet. Baserat på de givna resultaten borde det gå att nå en högre energieffektivisering genom att tillämpa nattsänkningen i fler zoner. Exempelvis i trapphus, lagerutrymmen och tekniska rum.

Den analytiska beräkningen av fall 1 visar resultat som liknar dem från datasimuleringen. I detta fall implementeras nattsänkning i tre timmar, vilket sparar ungefär 1,2 % energi. Däremot, om byggnaden har en längre tidskonstant, kan det leda till bättre resultat av energibesparing.

Det bör dock noteras att det är många faktorer som spelar roll och att denna studie enbart behandlar ett flerbostadshus med en tung stomme lokaliserad i Göteborg under februari månad med diverse andra förutsättningar, med andra ord mycket specifika förhållanden. Med det sagt kan det inte dras någon direkt slutsats att så är fallet. Det finns många olika kombinationer av faktorer att ta hänsyn till. För att nämna några avgörande faktorer är det klimatzonen, byggnadens tidskonstant, tid på året och så vidare.

Något som hamnar i kläm är den termiska komforten som kraftigt försämras. Resultatet visar en förändring på maximala antalet personer som upplevde diskomfort från 17% utan nattsänkning till 35% med fall 5. Först och främst innebär det att SS-EN ISO 7730 (svensk standard för termisk komfort) inte uppfylls och dessutom relativt kraftigt överskrids.

Vidare är det i praktiken en fråga om social hållbarhet och de boendes välbefinnande. Därför anser vi det inte skäligen att låta mer än var tredje människa vara missnöjd med sitt boende.



## 6.2 Byggnadens värmetröghet

Resultaten från analytiska beräkningar visar att temperaturen sjunker snabbt i lägenheten med den kortare tidskonstanten efter att värmen stängts av. Denna snabba temperaturminskning visar att lägenheten förlorar värme snabbt, vilket kan leda till ett ökat behov av uppvärmning för att upprätthålla en behaglig inomhusmiljö. Detta kan i sin tur leda till ett högre effektbehov och ökade uppvärmningskostnader. Å andra sidan minskar temperaturen långsammare i lägenheten med den längre tidskonstanten efter att värmen stängts av, vilket innebär att denna värmetröga lägenhet bibehåller en stabilare inomhustemperatur över längre perioder utan behov av att återaktivera värmesystemet. Denna egenskap, som beror på att lägenheten har god förmåga att lagra värme och är välisolerad, kan minska byggnadens totala energiförbrukning och därmed bidra till att uppnå miljömässiga hållbarhetsmål.

Det finns även olika studier som belyser hur byggnaders termiska tröghet kan utnyttjas för att förbättra effektiviteten i fjärrvärmesystem. För att undvika ett för högt värmebehov på morgonen när behovet av varmvatten är som störst, kan byggnadens termiska tröghet utnyttjas genom att optimera start- och sluttider för uppvärmning. Exempelvis kan uppvärmningssystemet programmeras att stängas av tidigare på kvällen och startas senare på morgonen utan negativt påverka komforten och minska effektbehov under höglastperioder. Byggnadens förmåga att långsamt släppa ut lagrad värme håller temperaturen stabil under de timmar då värmen är avstängd. Trots ett högt initialt effektbehov kan detta leda till energibesparingar.

## 6.3 Metodanalys

Eftersom IDA ICE är ett modellerings och- beräkningsprogram kan det endast ge uppskattningar och därmed inte ge något helt korrekt resultat. För att få en så exakt bedömning som möjligt bör mätningar utföras på plats. Med det sagt finns det många olika parametrar och inställningar som alla påverkar resultatet. Det innebär i sin tur att det medför osäkerheter och en hel del utrymme för felkällor. Exempelvis hade implementering av inställningar gällande skuggning och orientering påverkat hur solen träffar byggnaden och därmed beräkningarna. Vidare tas ingen hänsyn till inredning vilket i sin tur påverkar tidskonstanten. Exempelvis reducerar mattor den termiska överföringen mellan byggnadens konstruktionsdelar och luftens temperatur.

Andra eventuella felkällor kan vara uppbyggnaden av modellen. Modellen består av ett stort antal innerväggar där vissa är bärande och vissa är icke bärande. Risken finns att någon vägg är uppbyggd på fel sätt. Dock antas det inte ha någon större betydelse för helheten.

Även i de analytiska beräkningarna har faktorer som luftläckage inte tagits hänsyn till och en medeltemperatur antagits i stället för varierande utetemperaturer. Varje lägenhet är unik, och modellen kanske inte kan tillämpas på flera lägenheter i olika byggnader. Därför kommer resultaten att skilja sig från verkligheten.

Trots det bedöms metoderna som relativt akkurat med tanke på att resultatet stämmer väl överens med tidigare forskning.

## 7 Slutsatser

Sammanfattningsvis visar studien att nattsänkning är en tillämpbar metod för energibesparing. Energibesparingen för flerbostadshus kan uppskattningsvis vara högst några procent. Mängden energi som sparas är proportionell mot längden på nattsänkningen samt byggnadens tidskonstant. Dock medför det en risk för ett högre effektbehov vid återuppvärmning och försämrad termisk komfort för de boende. Genom att noggrant anpassa nattsänkingsstrategier till byggnadens värmetröghet kan effektbehov optimeras.

Ur ett hållbarhetsperspektiv bidrar nattsänkingsstrategi till en ökad ekologisk hållbarheten men kan samtidigt reducera den sociala hållbarheten.

För att knyta an till inledningen är energieffektivisering av bostäder fortsatt mycket viktigt. Vidare skulle vi rekommendera att undersöka andra tekniska åtgärder som eventuellt har en större effekt samt mindre negativ påverkan för de boende. För att ytterligare optimera byggnaders energiprestanda i olika miljöer krävs tillämpning av avancerade modeller och praktiska undersökningar.

## 8 Referenser

Boverket. (2024a, January 23). *Bygg- och fastighetssektorns energianvändning uppdelat på förnybar energi, fossil energi och kärnkraft*. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/energianvandning/>

Boverket. (2024b, February 7). *Termiskt klimat*. <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/termiskt-klimat/>

Clean Technica. (2015). *The Great "Power vs. Energy" Confusion*. <https://cleantechnica.com/2015/02/02/power-vs-energy-explanation/>

ChatGPT (2024).

EQUA. (2024). *Anpassning Sverige*. <https://www.equa.se/se/ida-ice/anpassningar/sverige>

Folkhälsomyndigheten. (2023, February 9). *Vägledning om ventilation*. <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/miljohalsa-och-halsoskydd/tillsyn-inom-halsoskydd/ventilation/>

Göteborg Energi. (2024). *Effektflexibilitet - spara effekt och tjäna pengar*. [https://www.goteborgenergi.se/foretag/flexibilitet?mtm\\_campaign=foretag\\_flexibilitet&mtm\\_source=google&mtm\\_medium=cpc&mtm\\_group=flexibilitet&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiAuNGuBhAkEiwAGId4ak9N3la5D4pPau0PF-GZ1EeMkOUZUaaN97\\_KtqKUFofnq46td5Uw1BoCTAcQAvD\\_BwE](https://www.goteborgenergi.se/foretag/flexibilitet?mtm_campaign=foretag_flexibilitet&mtm_source=google&mtm_medium=cpc&mtm_group=flexibilitet&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAuNGuBhAkEiwAGId4ak9N3la5D4pPau0PF-GZ1EeMkOUZUaaN97_KtqKUFofnq46td5Uw1BoCTAcQAvD_BwE)

Guenther, S. (2024, March 11). *What Is PMV? What Is PPD? The Basics of Thermal Comfort*. <https://www.simscale.com/blog/what-is-pmv-ppd/>

Hagentoft, C.-E., & Sandin, K. (2017a). *Byggnadsfysik - så fungerar hus* (1st ed.). Studentlitteratur.

Hagentoft, C.-E., & Sandin, K. (2017b). *Byggnadsfysik - så fungerar hus* (1st ed.). Studentlitteratur.

Karlsson, J., Wadsö, L., & Öberg, M. (2013). A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures. *Energy and Buildings*, 60, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.017>

Kensby, J., Trüschel, A., & Dalenbäck, J.-O. (2015). Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating

systems - Results from a pilot test. *Applied Energy*, 137, 773–781.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.026>

Naturvårdsverket. (2023, December 1). *Energieffektivisering*.  
<https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-energin/energieffektivisering/>

Oreilly. (n.d.). *PRE-PROCESSING AND POST-PROCESSING*. Retrieved May 10, 2024, from <https://www.oreilly.com/library/view/finite-element-method/9788131724644/xhtml/sub1.6.xhtml>

Petersson, B.-Å. (2018). *Tillämpad byggnadsfysik* (6th ed.). Studentlitteratur.

Ren, I. (2024, February 27). *Numerisk analys*.  
<https://www.kth.se/sv/math/naost/na>

Sasic Kalagasidis, A. (2019). *Kompendium för byggnadsfysik i kurserna BOM320 och BOM365*.

Socialstyrelsen. (2005). *Temperatur inomhus*. Socialstyrelsen.  
<https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/a22abd3cdc1042e195d50fe4484a7fb9/temperatur-inomhus.pdf>

Sveby. (2012a). *Brukarindata bostäder*. [https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/10/Sveby\\_Brukarindata\\_bostader\\_version\\_1.0.pdf](https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/10/Sveby_Brukarindata_bostader_version_1.0.pdf)

Sveby. (2012b). *Brukarindata bostäder*. [https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/10/Sveby\\_Brukarindata\\_bostader\\_version\\_1.0.pdf](https://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/10/Sveby_Brukarindata_bostader_version_1.0.pdf)

Zhang, F., Bales, C., & Fleyeh, H. (2021). Night setback identification of district heat substations using bidirectional long short term memory with attention mechanism. *Energy*, 224.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120163>

## Bilagor

Material	Tjocklek [mm]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Värmekonduktivitet [W/mK]	Specifik värmekapacitet [J/Kg K]
<b>Tak</b>				
Stål	1.5	7800	50	450
trä	12	500	0.13	1500
Luft	22	1.2	0.11	1006
Lättisolering	27	20	0.036	800
Lättisolering	70	20	0.036	800
Luft	45	1.2	0.25	1006
Gips	13	800	0.22	800
Gips	13	800	0.22	800
Gips	13	800	0.22	800
<b>Yttervägg</b>				
Tegel	120	1500	0.7	800
Luftspalt	30	1.2	0.17	1006
Mineralull	50	20	0.036	800
Mineralull	190	20	0.036	800
Betong	120	2300	1.7	900
<b>Bärande innervägg</b>	<b>220</b>	<b>2300</b>	<b>1.7</b>	<b>900</b>
<b>Icke bärande innervägg</b>				
Gips	13	800	0.22	800
Trä	12	500	0.13	1500
Luft	45	1.2	0.25	1006
Trä	12	500	0.13	1500
Gips	13	800	0.22	800
<b>Innegolv</b>				
Parkett (trä)	20	500	0.13	1500
Mineralull	5	20	0.036	800
Betong	50	2300	1.7	900
Betong	200	2300	1.7	900

*Bilaga 1: Lagerföljd, materialval, tjocklek och byggnadstermiska egenskaper för byggnadsdelarna.*

Zone	Max PPD, %
1.LGH1.Vardag+Kök	34.96
1.LGH6.Vardag+Kök	31.55
3.LGH1.Vardag+Kök	30.76
3.LGH6.Vardag+Kök	30.31
1.LGH1.Sovrum	28.19
2.LGH1.Vardag+Kök	27.12
2.LGH6.Vardag+Kök	27.1
1.LGH3.Vardag	26.38
1.LGH6.Sovrum	25.57
1.LGH3.Sovrum2	25.23
3.LGH1.Sovrum	25.15
1.LGH4.Vardag	24.9
3.LGH6.Sovrum	24.72
3.LGH4.Vardag	24.43
3.LGH3.Vardag	24.29
1.LGH4.Sovrum2	23.51
3.LGH4.Sovrum2	22.66
3.LGH3.Sovrum2	22.64
1.LGH2.Sovrum	22.37
1.LGH5.Sovrum	22.33
1.LGH3.Sovrum1	22.27
2.LGH6.Sovrum	21.98
2.LGH1.Sovrum	21.97
3.LGH5.Sovrum	21.82
1.LGH2.Vardag	21.75
2.LGH4.Vardag	21.66
2.LGH3.Vardag	21.66
1.LGH5.Vardag	21.48
3.LGH5.Vardag	21.08
3.LGH2.Sovrum	20.83
1.LGH4.Sovrum1	20.3
3.LGH2.Vardag	20.17
2.LGH4.Sovrum2	20.14
2.LGH3.Sovrum2	20.12
2.LGH5.Sovrum	19.85
3.LGH4.Sovrum1	19.76
3.LGH3.Sovrum1	19.7
2.LGH2.Sovrum	19.66
2.LGH5.Vardag	19
2.LGH2.Vardag	18.9
2.LGH3.Sovrum1	17.61
2.LGH4.Sovrum1	17.59

*Bilaga 2: PPD för zonerna för fall 5i9*

Zone	Max PPD, %
1.LGH5.Vardag	17.26
1.LGH5.Sovrum	17.23
1.LGH2.Vardag	17.2
1.LGH2.Sovrum	17.19
1.LGH4.Vardag	16.87
1.LGH6.Vardag+Kök	16.87
3.LGH5.Vardag	16.78
3.LGH5.Sovrum	16.78
1.LGH1.Vardag+Kök	16.61
1.LGH6.Sovrum	16.56
1.LGH3.Vardag	16.53
2.LGH5.Sovrum	16.49
2.LGH2.Sovrum	16.47
2.LGH5.Vardag	16.44
2.LGH2.Vardag	16.42
3.LGH2.Sovrum	16.4
1.LGH4.Sovrum1	16.38
3.LGH2.Vardag	16.36
3.LGH4.Vardag	16.34
1.LGH4.Sovrum2	16.33
3.LGH3.Vardag	16.31
3.LGH6.Vardag+Kök	16.3
1.LGH1.Sovrum	16.25
3.LGH1.Vardag+Kök	16.17
1.LGH3.Sovrum1	16.15
2.LGH1.Vardag+Kök	16.09
3.LGH6.Sovrum	16.09
2.LGH6.Vardag+Kök	16.08
2.LGH4.Vardag	16.07
2.LGH3.Vardag	16.05
1.LGH3.Sovrum2	16.01
3.LGH4.Sovrum1	15.96
3.LGH3.Sovrum1	15.93
3.LGH1.Sovrum	15.92
3.LGH3.Sovrum2	15.89
3.LGH4.Sovrum2	15.89
2.LGH6.Sovrum	15.76
2.LGH1.Sovrum	15.75
2.LGH3.Sovrum2	15.6
2.LGH4.Sovrum2	15.6
2.LGH4.Sovrum1	15.58
2.LGH3.Sovrum1	15.57

*Bilaga 3: PPD för zonerna för fall 0*