

Hantering av variationer i energi-beräkningar för bostadshus

Åsa Lindell

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2005
Rapport TVIT--05/5007



Lunds Universitet

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

Avdelningen för installationsteknik

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

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktvärmade hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspridning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod.

Hantering av variationer i energi-beräkningar för bostadshus

Åsa Lindell

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2005
Rapport TVIT--05/5007

© Åsa Lindell, 2005

ISRN LUTVDG/TVIT--05/5007--SE(96)

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

Sammanfattning

Bakgrunden till denna studie är svårigheten att i ett tidigt skede av en byggprocess beräkna energibehovet i byggnaden så att det överensstämmer med det som byggnaden verkligen har i drift. Det uppmätta energibehovet är oftast betydligt högre än det beräknade. Från och med år 2006 ställer samhället nya krav på byggnaders energianvändning i form av maximalt tillåtet energibehov och obligatorisk energideklaration. Kraven förstärker behovet av mer tillförlitliga energiberäkningar.

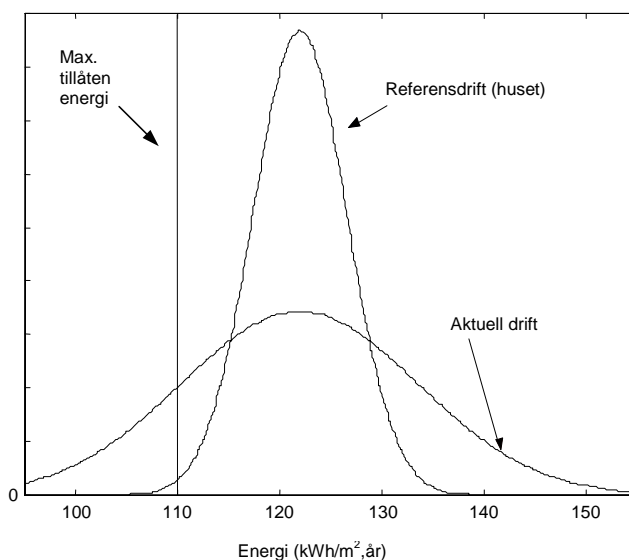
Studien syftar till att utveckla mer tillförlitliga energiberäkningar för byggnader och att undersöka hur variationer i energiberäkningen kan hanteras. Detta görs genom att nyttja metodik som används vid dimensionering av konstruktioner.

Vid dimensionering beaktas både konstruktionens bärförmåga och dess påfrestningar (laster). Dessa kan inte beräknas exakt eftersom variablerna är besläktade med osäkerheter av olika slag. En tillförlitlighetsanalys utförs för att verifiera att påfrestningarna, med tillräckligt hög sannolikhet, inte överstiger bärförmågan. Partialkoefficientmetoden är en förenklad verifikationsmetod där partialkoefficienter tar hänsyn till osäkerheter hos de olika variablerna individuellt.

I studien appliceras tillförlitlighetsanalysen på energiberäkningar för bostadshus. I analogi med konstruktionstekniken ansätts ”bärförmåga” och ”påfrestningar”. Bärförmågan sätts till samhällets maximalt tillåtna energianvändning och påfrestningarna sätts till husets beräknade energibehov. Variablerna i energiberäkningen tillåts variera, för att ta hänsyn till osäkerheter av olika slag. T ex är det omöjligt att bestämma innetemperaturen exakt, den antas istället variera i ett intervall. Eftersom variablerna varierar kommer även det beräknade energibehovet variera. Metodens tillvägagångssätt kan schematiskt beskrivas:

1. Definiera energiberäkningen och identifiera dess variabler.
2. Undersök hur variablerna varierar genom att analysera data eller genom erfarenhetsmässiga uppskattningar.
3. Beräkna energibehovet genom att utföra ett högt antal beräkningar, där variablernas värden slumpas fram för varje beräkning. Detta resulterar i en mängd värden på energibehovet, som sammanställs till en fördelning med ett medelvärde och en standardavvikelse.
4. Beräkna sannolikheten för att påfrestningarna (energiebehovet) överstiger bärförmågan (maximal tillåten energianvändning).

Metoden testas genom att simulera energibehovet för ett specifikt hus. För att se om variationerna kan knytas främst till själva huset eller till dem som använder huset beräknas energibehovet både för ”normalt bruk”, s.k. referensdrift (då brukaren är en ”genomsnittsbrukare”) och för aktuell drift (då även de variabler som är brukarberoende varierar).



Resultaten från simuleringarna visar att energibehovet för referensdriften varierar betydligt mindre än för den aktuella driften. Detta betyder att variationer i energiberäkningen främst beror av de variabler som är brukarberoende. Känslighetsanalys av variablerna visar att innetemperaturen, som bestäms av brukarna, är den variabel som står för den absolut största delen av energiberäkningens spridning.

Bärförmågans (maximal tillåten energianvändning) värde är betydligt lägre än påfrestningarnas medelvärde (energiebehov för de två drifttyperna). Sannolikheten för att energianvändningen ska överstiga maximalt tillåtet energibehov är därför mycket hög, 0.99 för referensdriften och 0.84 för den aktuella driften. Denna brottsannolikhet är att betrakta som extremt hög och borde inte accepteras från samhällets sida. För bostäder borde en acceptabel nivå vara runt 0.1, dvs. att ett av tio hus inte klarar samhällets krav på energiprestanda. Detta kan uppnås genom att öka bärförmågan, dvs. höja gränsen för det maximalt tillåtna energibehovet, eller genom att minska påfrestningarna, dvs. minska husets energibehov.

Simuleringarna visar att tillförlitlighetsanalysen kan appliceras på energiberäkningar för bostadshus. Studien erbjuder således en metod för att hantera variationer i energiberäkningarna genom att ta hänsyn till variablernas osäkerheter individuellt. Då många variabler är osäkra är det mer rättvist att tidigt i byggskedet ange framtida energibehov i ett intervall istället för som ett absolut tal. Metoden är enkel att använda och är ett första steg till att applicera partialkoefficientmetoden på energiberäkningar för byggnader. Svårigheten ligger i att bestämma variablernas variation på ett riktigt sätt. För att vidareutveckla metoden krävs därför omfattande studier för att ytterligare undersöka variablernas faktiska variation.

Vidare tyder studiens simuleringar på att de variabler som kan knytas till en byggnads användare är svårast att bestämma. Variabler knutna till husets prestanda kan uppskattas mer exakt. För att få mer tillförlitliga energiberäkningar är det därför mer relevant att noggrannare undersöka de brukarberoende variablerna än att exakt beräkna de variabler som beror av huset.

Summary

Calculating the future energy usage of a building early in the design process has proven problematic. The actual use of energy is often much higher than the calculated usage. In 2006, the government will bring in new regulations for use of energy in buildings including maximum allowed energy usage and compulsory declarations of energy performance. This calls for more accurate methods for calculating energy usage.

The aim of this thesis is to identify and examine the uncertain elements in energy calculations and to develop methods for more accurate calculations. This is done by using methods from the discipline of structural design.

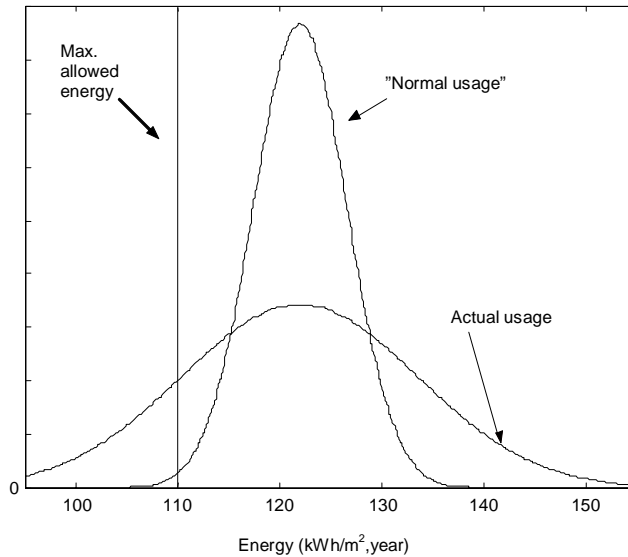
Structural design deals with dimensions of different types of constructions. Both the resistance in the construction and the load effect working on the construction are taken into account, and both are associated with different kinds of uncertainties; strengths of materials, variable loads due to traffic/human/ weather etc. Hence neither the resistance nor the load effect can be precisely calculated. A reliability analysis is carried out in order to verify, with high probability, that the load effect does not exceed the resistance. A simplified method for verification with partial coefficients is normally used, where the partial coefficients account for different uncertainties.

In this study, the reliability analysis is applied to energy calculations for buildings. In line with structural design, both “resistance” and “load effect” for the energy calculation are defined. The “resistance” is the government’s regulation on the allowable maximal energy use and the “load effect” is the calculated use of energy for the building. The variables are stochastic in order to account for uncertainties. For example, as it is not possible to measure the indoor temperature as a fixed number, a temperature range is assumed instead. Since the variables are not static, the calculated use of energy will vary. The method developed through applying the reliability analysis on energy calculations for buildings is outlined below:

1. Define the energy-calculation and its variables.
2. Examine the range of the variables by analysing data or by empirical estimations.
3. Calculate the use of energy by performing multiple iterations, with random values from the variables for each computation. This results in a large number of values for the calculated energy usage. The distribution of these values is then analysed for mean and standard deviation.
4. Calculate the probability of failure: the probability that the load effect (calculated use of energy) will exceed the resistance (maximal allowed use of energy).

In order to test the method, a simulation of energy usage for a specific residential house is carried out. In order to determine whether uncertainties are mainly due to the residents or to the house, the energy is calculated for both “normal usage” (where

only those variables due to the standard of the house are stochastic, i.e. insulation, ventilation etc.) and for actual usage (where the uncertainties due to the residents also are taken into account, i.e. indoor temperature, hot water usage etc.). The results are shown in the figure below.



The results from the simulations show that the energy usage varies much more for actual usage than for “normal usage”. The results therefore show that the uncertainties in the energy calculation are due mainly to the residents. A sensitivity analysis indicates that the indoor temperature is accountable for most of the variations in the energy calculation.

The resistance (maximal allowed energy use) is also shown in the figure. The mean value for both actual and “normal” energy usage is much higher than the value for the resistance. The probability for the load effect to exceed the resistance is therefore very high, 0.99 for “normal usage” and 0.84 for the actual usage. Since such a high probability of failure is not acceptable, it must be reduced. This is done either by increasing the resistance (i.e. changing regulations) or by decreasing the load effects (i.e. lowering the energy usage in the building).

The simulations show that the reliability analysis can be applied on energy calculations for buildings. Consequently this thesis presents a method for managing the elements of uncertainties in the energy calculations by considering variations within variables individually. The method is straightforward and only requires a simulation program. By analysing the uncertainties in the variables individually, the method can cope with elements of uncertainty in the energy calculations. It is also a first step towards applying partial coefficients on calculated energy usage for buildings. Since the majority of the variables are uncertain, one can argue that it’s more realistic to calculate the energy use in a range than as an absolute number.

However, it is necessary to further examine the actual variations within the variables in order to develop the method.

By analysing the uncertainties in the variables individually, the method can cope with elements of uncertainty in the energy calculations. It is also a first step towards applying partial coefficients on calculated energy usage for buildings.

The results from the simulations indicate that variation due to the behaviour of users is more complex and uncertain than the variation due to the design of the actual building. It is therefore recommended to further examine the variables influenced by the resident's behaviour, rather than focusing on precise calculations for the variables due to building design.

Förord

Detta examensarbete har utförts under perioden mars till september år 2005 och är ett samarbete mellan avdelningen för installationsteknik vid Lunds Tekniska Högskola och Skanska Teknik i Malmö. Handledare har varit Catarina Warfvinge på Lunds Tekniska Högskola och Carl Jonsson på Skanska Teknik.

Under arbetets gång har jag förlitat mig på assistans från ett flertal personer med kompetenser inom olika områden. Ett stort tack till alla er som har visat intresse för mitt arbete och tagit er tid att besvara mina frågor.

Jag vill framför allt tacka mina handledare Catarina Warfvinge och Carl Jonsson för er entusiasm för ämnet och er tilltro till mitt arbete. Jag vill även tacka Joakim Jeppsson och Sven Thelandersson för ovärderlig guidning i konstruktionsteknikens teorier, ett för mig helt nytt ämne.

Vidare vill jag tacka Lars Jensen, Anders Almgren, Helena Bülow-Hübe med flera för all information angående energianvändning i byggnader. Även stort tack till Martin Hansson för hjälp med simuleringarna. För support på Skanska under arbetets gång vill jag tacka Johanna Nordström, Sara Andersson, Liselott Andersson och alla andra på Skanska Teknik som varit behjälpliga under det senaste halvåret.

Sist men inte mist: tack till familj och vänner för all er uppmuntran under arbetets gång!

Malmö, september 2005

Åsa Lindell

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	SYFTE.....	2
1.2	METOD.....	3
1.3	STRUKTUR.....	4
1.4	MÅLGRUPP.....	4
1.5	AVGRÄNSNINGAR.....	5
1.6	FÖRTYDLIGANDEN.....	6
2	BAKGRUND	7
2.1	ENERGIBERÄKNINGAR VS FAKTISK ENERGIANVÄNDNING.....	7
2.2	NYA REGLER.....	8
2.2.1	<i>Boverkets Byggregler</i>	8
2.2.2	<i>EU: Energideklarering av byggnader</i>	9
3	ENERGIANVÄNDNING I BOSTADSHUS	11
3.1	ÖVERSIKT.....	11
3.1.1	<i>Tillskott</i>	12
3.1.2	<i>Förluster</i>	13
3.2	ENERGIBALANS.....	14
3.2.1	<i>Transmission</i>	15
3.2.2	<i>Ventilation och läckage</i>	16
3.2.3	<i>Varmvatten</i>	16
3.2.4	<i>Distributions- och reglerförluster</i>	17
3.2.5	<i>Fastighetsel</i>	17
3.2.6	<i>Återvinning</i>	17
3.2.7	<i>Tillskott</i>	17
3.3	PRESTANDABEROENDE OCH BRUKARBEROENDE PARAMETRAR OCH DESS VARIANSER.....	18
4	STATISTIK	21
4.1	ÖVERSIKT.....	21
4.2	MONTE CARLO SIMULERING.....	24
5	KONSTRUKTIONSTEKNIK	25
5.1	DIMENSIONERING MED TILLFÖRLITLIGHETSANALYS.....	25
5.2	PARTIALKOEFFICIENTMETODEN.....	29
5.2.1	<i>Dimensionering med partialkoefficienter</i>	29
5.2.2	<i>Permanenta och variabla laster</i>	30
5.2.3	<i>Bestämning av partialkoefficienter, karakteristiska värden och lastreduktion</i>	32
5.3	KÄNSLIGHETSANALYS.....	33
6	APPLIKATION AV PARTIALKOEFFICIENTMETODEN PÅ ENERGIBERÄKNINGAR	34

6.1	ANALOGIER MELLAN BYGGKONSTRUKTIONENS DIMENSIONERINGSBERÄKNINGAR OCH BYGGFYSIKENS ENERGIBERÄKNINGAR	34
6.2	APPLICERING AV PARTIALKOEFFICIENTMETODEN	36
7	SIMULERING: BAKGRUND OCH INDATA	39
7.1	DEFINITION AV SIMULERINGSEKVATIONER.....	40
7.2	VARIABLER OCH KONSTANTER.....	41
7.2.1	<i>Transmissionsförluster</i>	43
7.2.2	<i>Ventilations- och läckageförluster</i>	44
7.2.3	<i>Energi till tappvarmvatten</i>	45
7.2.4	<i>Drifts- och reglerförluster</i>	46
7.2.5	<i>Fastighetsel</i>	46
7.2.6	<i>Tillskottsvärme</i>	46
7.2.7	<i>Återvinning</i>	48
8	SIMULERING: RESULTAT OCH ANALYS	49
8.1	RESULTAT	49
8.1.1	<i>Referensdrift</i>	50
8.1.2	<i>Aktuell drift</i>	56
8.1.3	<i>Brukardrift</i>	61
8.2	ANALYS AV SIMULERINGSRESULTAT	65
8.2.1	<i>Spridning/osäkerhet</i>	66
8.2.2	<i>Brottsannolikhet</i>	67
8.2.3	<i>Partialkoefficienter</i>	68
9	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	70
9.1	METODUTVECKLING FÖR HANTERING AV OSÄKERHETER I ENERGIBERÄKNINGAR FÖR BOSTADSHUS	70
9.2	IDENTIFIKATION AV ENERGIBERÄKNINGENS OSÄKRA ELEMENT	72
9.3	SLUTSATSER UTIFRÅN SIMULERINGSRESULTATEN.....	72
9.4	FORTSATT ARBETE.....	73
10	REFERENSER.....	75
10.1	TRYCKTA KÄLLOR.....	75
10.2	ELEKTRONISKA KÄLLOR	76
10.3	MUNTLIGA KÄLLOR	77
10.4	FÖRETAGSINTERNA KÄLLOR	77
BILAGA A: MATLAB FIL FÖR ENERGISIMULERING		79
BILAGA B: DATAUNDERLAG.....		81

1 Inledning

Varför behövs tillförlitliga energiberäkningar för byggnader?

Byggsektorn förbrukar drygt en tredjedel av Sveriges totala energianvändning¹ och står därmed för en betydande miljöpåverkan. Den största delen av energin, 85 %, nyttjas under byggnadens användarskede.² Om energianvändningen i byggnader kan effektiviseras finns således stora besparingspotentialer, både ekonomiskt och miljömässigt.

Ett allmänt problem inom byggbranschen är svårigheten att i ett tidigt skede av byggprocessen beräkna energibehovet i hus så att det överensstämmer med det som huset verkligen har i drift. Den faktiska energianvändningen är vanligen betydligt högre än den beräknade.³ Detta har fört med sig att misstroendet mot energiberäkningar är stort. Därmed förlorar man också en unik chans att vid nybyggnad skapa energieffektiva hus, eftersom de ekonomiska incitamenten i och med låg energianvändning är så pass osäkra.

Energiberäkningarna utförs oftast i något av de kommersiella beräkningsprogram som finns på marknaden. Dessa skiljer sig åt i komplexitet och noggrannhet. Gemensamt är att energiberäkningarna består av en mängd variabler, där t ex byggnadstekniska variabler bestäms med mycket hög noggrannhet. Andra variabler, knutna till produktion av huset och till brukarna under brukartiden, uppskattas grovt, ofta genom schablonvärden. En energitekniker som har lång erfarenhet av energiberäkningar kan få en relativt stor träffsäkerhet i sina energiberäkningar – men det bygger mer på känsla än välgrundad kunskap.

För att styra mot lägre energianvändning utformar Boverket för närvarande nya regler för energihushållning i byggnader. Dessa innebär att samhället fastställer en högsta nivå för den energianvändning som kan accepteras. De nya reglerna ställer också krav på att byggnadens verkliga energibehov efter något års drift ska mätas och jämföras mot kravet.⁴ Även inom EU utarbetas nya regler gällande energianvändning i byggnader, där varje byggnad ska förses med en energideklaration. Deklarationen ska grundas på både beräknad och operativ energiprestanda.⁵

Tillförlitliga energiberäkningar för byggnader behövs följaktligen för att:

- Säkerställa att byggnadens faktiska energianvändning kommer att leva upp till samhällets nya krav.
- Förstärka incitamenten till att bygga energieffektivt.

¹ Persson, Agneta. *Energianvändning i bebyggelsen*.

² Adelberth, Karin. *Energy Use and Environmental Impact of New Residential Buildings*.

³ Köhler, Niclas. *Byggherrar räknar fel på energiförbrukningen*.

⁴ Boverket. *Remiss: Förslag till revidering av Boverkets Byggregler*. Kap. 9

⁵ CEN. *Energy performance in buildings*.

Ett sätt att angripa osäkerheten i energiberäkningen är att beakta osäkerheten i de olika variablerna (som isolergrad, varmvattenförbrukning m.m.) individuellt. På så sätt kan de mest betydelsefulla/osäkra variablerna identifieras. Om t ex vissa brukarberoende variabler visar sig vara mycket svåra att bestämma är det kanske inte lönt att beräkna vissa byggnadstekniska variabler med hög noggrannhet, eftersom resultatet ändå blir så pass osäkert. Då variablernas osäkerhet behandlas individuellt kan även energiberäkningens totala osäkerhet uppskattas. Energianvändningen kan därmed uppskattas i ett intervall istället för att beräknas till ett fixt tal.

Inom konstruktionstekniken finns idag väl utvecklade metoder för att bedöma osäkerheter vid dimensionering av konstruktioner. Dessa har utvecklats eftersom konstruktionsfel kan få mycket stora konsekvenser. T ex innehåller beräkningen av en konstruktions bärförmåga en mängd variabler som är besläktade med diverse osäkerheter. Den lasteffekt som antas verka på konstruktionen innehåller osäkerheter av andra slag. För att kunna dimensionera en ”säker” konstruktion görs ofta en tillförlitlighetsanalys där konstruktionens bärförmåga ställs mot lasternas påverkan. Här behandlas variablernas variabilitet individuellt och vanligen används den s.k. partialkoefficientmetoden, där partialkoefficienterna kan förklaras som ”säkerhetsfaktorer” som individuellt beaktar osäkerheter i de olika parametrarna som laster, material, provningsunderlag, beräkningsmodellerna och konsekvensen av materialbrott.⁶ Variabler som är osäkra är förbundna med större partialkoefficienter. Detta för att säkerställa att bärförmågan, med tillräckligt hög sannolikhet, är större än lasterna. Metoden är vedertagen och partialkoefficienter finns tabellerade för olika laster, kombinationer av lastpåverkan och material.⁷

Genom att ta till vara på den kunskap som finns inom konstruktionstekniken är förhoppningen att applicera en teoretisk arbetsmetod för att hantera partiella osäkerheter för byggnaders energiberäkningar.

1.1 Syfte

Studiens huvudsyfte är att undersöka osäkerheter i energiberäkningen för byggnader och att utveckla metoder för att identifiera och hantera dessa osäkerheter. Detta görs genom att använda redan väl utvecklad metodik från konstruktionstekniken. Förhoppningen är att grundlägga ett teoretiskt säkerhetstänkande för byggfysikens energiberäkningar där osäkerheterna behandlas individuellt. Här finns många paralleller med dimensionering av konstruktioner. Mer specifikt är syftet att applicera tillförlitlighetsanalysen och partialkoefficientmetoden på energiberäkningen för byggnader. Intentionen är att se om metodiken är lämplig även för energiberäkningen.

⁶ Isaksson, Tord, Mårtensson, Annika och Thelandersson, Sven. *Grunderna i Byggekonstruktion*.

⁷ Boverket. *Regler för konstruktioner*.

Studiens syfte är således att besvara frågorna:

- Hur kan energiberäkningar för byggnader göras mer tillförlitliga?
- Hur kan osäkerheter i energiberäkningar för byggnader identifieras?
- Är osäkerheterna knutna till dem som bor i huset eller till husets prestanda?
- Hur kan den kunskap som redan finns inom konstruktionstekniken användas för att hantera osäkerheter i energiberäkningarna för byggnader?
- Är det lämpligt att applicera tillförlitlighetsanalysen och partialkoefficientmetoden på energiberäkningar för byggnader? Och i så fall:
- Hur kan detta göras i praktiken?

Vidare är studiens syfte att öka medvetenheten kring energianvändning i byggnader och vikten av tillförlitliga energiberäkningar.

1.2 Metod

Studiens huvudsyfte är att undersöka osäkerheter i energiberäkningen för byggnader. Problemet angrips genom att göra ansatser för att tillämpa konstruktionsteknikens tillförlitlighetsanalys på byggfysikens energiberäkningar. För att kunna göra detta måste först följande frågor besvaras:

- Hur beräknas energianvändningen för byggnader?
- Vad är energiberäkningens variabler beroende av?
- Hur används tillförlitlighetsanalyser (partialkoefficientmetoden i synnerhet) inom konstruktionstekniken?

Frågorna utreds genom att studera den bakomliggande teorin inom områdena byggfysik och konstruktionsteknik. Eftersom partialkoefficientmetoden bygger på sannolikhetsteoretiska metoder studeras även den bakomliggande statistiska teorin.

Dimensionering av konstruktioner utgår ifrån en verifikation av att lasteffekten inte överstiger konstruktionens bärförmåga med betryggad säkerhet. Detta kallas tillförlitlighetsanalys. För analysen krävs:

- En matematisk modell för dimensioneringsberäkningen, inklusive ekvationer för de ingående variablerna.
- Att variablernas variabilitet är kända.
- En önskad säkerhetsnivå för att påfrestningarna inte överskrider bärförmågan.

Ovanstående tillvägagångssätt tillämpas på energiberäkningen. Energiberäkningen ställs upp som en energibalans, som väljs för att passa studiens syfte. En matematisk modell anges för energibalansen, där de olika delposterna definieras. Ekvationer bestäms för de samtliga delposter. Ekvationerna består både av stokastiska och deterministiska variabler. Härigenom synliggörs vilka variabler som betraktas som osäkra.

För att omsätta den teoretiska analogin mellan byggfysiken och byggkonstruktionen i praktiken utförs en applikation på energiberäkningen för ett typhus som exempel. I exemplet används Skanskas ”Moderna Hus” i Örebro som typhus. För typhuset simuleras energianvändningen, där variablerna återfinns i ett intervall istället för att anta ett fixt värde. På så sätt kan de största osäkerheterna identifieras. Syftet med simuleringen är att se hur användbar tillförlitlighetsanalysen är i praktiken samt att åskådliggöra hur tillämpningen kan se ut för ett verkligt fall.

För att genomföra simulering uppskattas de stokastiska variablernas. Detta görs genom att studera tillgänglig statistik samt genom att kartlägga erfarenhetsmässig kunskap från spetskompetens inom de olika områdena. Inför simuleringarna kartläggs även typhusets faktiska förutsättningar.

Energisimuleringarna genomförs med Monte Carlo metoden, som beräknar en funktions totala spridning då funktionens variabler är stokastiska. Energiberäkningen simuleras främst i Matlab men kompletteras med känslighetsanalys i det kommersiella programmet Comrel.

Huruvida det är lämpligt att använda tillförlitlighetsanalyser på energiberäkningen diskuteras efter genomförandet av simuleringarna.

1.3 Struktur

Studien börjar med en översiktlig presentation av nuläget och av tidigare relevanta studier, samt en beskrivning av de nya regler från Boverket och EU som rör byggnaders energiprestanda. Avsnitten finns i kapitel 2.

Vidare ges en teoretisk bakgrund till energiberäkningar och definition av den energibalans som används i studien i kapitel 3. I kapitel 4 följer en översikt av den statistiska teori som används i studien, samt beskrivning av simuleringstekniken. Dimensionering med tillförlitlighetsanalys introduceras i kapitel 5.

Teoretisk applikation av konstruktionsteknikens tillförlitlighetsanalys på energibalansen utförs i kapitel 6, där även en schematisk analogi mellan dimensioneringsberäkningar och energiberäkningar görs. Simuleringarna av typhusets energianvändning görs i kapitel 7. I kapitel 8 analyseras simuleringens resultat.

Rapporten avslutas i kapitel 9 med en utvärdering av studien och diskussion om huruvida konstruktionsteknikens metoder är lämpliga för byggnaders energiberäkningar.

1.4 Målgrupp

Studiens målgrupp är energiexperter vid berörda myndigheter, byggherrar som ska uppföra bostäder under de nya direktiven samt tekniker som arbetar med energiberäkningar för bostäder. Dessutom är studiens målgrupp forskare, teknikutvecklare och andra med intresse för energianvändning i byggnader.

1.5 Avgränsningar

Studien är en ansats till att utveckla metoder för att hantera osäkerheter i energiberäkningar för byggnader. Detta görs genom att applicera metodik från konstruktionstekniken på energiberäkningen: tillförlitlighetsanalys i allmänhet och partialkoefficientmetoden i synnerhet. Här är det viktigt att notera att endast vissa delar ur metodiken från tillförlitlighetsanalysen används. De delar som används väljs enbart på basis av lämplighet för energiberäkningen. Stora delar av konstruktionsteknikens metoder/partialkoefficientmetoden utelämnas därför.

Energisimuleringen för bostadshus begränsas av att simuleringen endast görs på ett typhus. Vidare är datainsamlingen för energiberäkningens delposter begränsad av tillgången av relevant datamaterial. Således kan inte generella slutsatser dras från simuleringarna. Simuleringsavsnittet ska i första hand ses som ett försök att omsätta den alternativa energiberäkningen i praktiken.

Partialkoefficientmetodens koefficienter bestäms genom en kombination av sannolikhetsteoretiska analyser, erfarenhetsmässiga bedömningar och politiska beslut. Eftersom betydelsen av de sannolikhetsteoretiska analyserna endast utgör en del av bestämningsprocessen utelämnas denna teori i studien. Istället förs en generell diskussion för hur partialkoefficienterna kan bestämmas.

Byggnaders värmesystem dimensioneras för att klara att upprätthålla ett inneklimat under vissa förhållanden i uteklimatet. Detta kallas dimensionerad värmeeffekt och det finns tydliga anvisningar för hur denna ska utformas i byggnormerna. Den dimensionerade effekten är betydelsefull för den totala energianvändningen: ett överdimensionerat värmesystem kan innebära energiförluster. I studien behandlas dock enbart årlig energianvändning, ingen hänsyn tas till den dimensionerade värmeeffekten.

I studien representeras byggnader av flerbostadshus. Flerbostadshus väljs dels för att kunna vara mer specifik i beskrivning av energibalansens delposter, dels för att trenden tyder på ökad energianvändning för just flerbostadshus.⁸ Teori om energianvändning gäller således endast för flerbostadshus. Det typhus som används för simuleringarna är ett flerbostadshus.

Hur energiomsättningarna ser ut för byggnader såsom fabrikslokaler, småhus och kontor utelämnas.

⁸ Köhler, Niclas. *Nybyggda bostadshus slukar allt mer energi.*

1.6 Förtydliganden

I studien refereras ofta till byggnaders energianvändning. För att undvika upprepningar så anges all energianvändning i kWh per kvadratmeter och år om inte annat uppges. Om inte annat anges så syftar arean ”per kvadratmeter” alltid på bruksarean, BRA. Bruksarean är den area som begränsas av ytterväggarnas insida och som i stort motsvarar hela den uppvärmda ytan. Energianvändningen avser alltid årsförbrukningen.

Energianvändningen anges alltså i kWh/m²_{BRA}, år men skrivs i studien som kWh/m².

2 Bakgrund

I kapitlet redovisas några jämförelser mellan faktisk och beräknad energianvändning i bostadshus samt en genomgång av tidigare relevanta studier. Därefter presenteras de nya direktiven om bostäders energiprestanda.

2.1 Energiberäkningar vs faktisk energianvändning

För att avgöra hur mycket energi en planerad byggnad kommer att använda görs ofta en energiberäkning tidigt i planeringsstadiet. Detta är ingenting som statens byggregler för närvarande kräver, däremot ställer markägare och fastighetsägare många gånger krav på byggnadens energiprestanda. Energianvändningen beräknas ofta i simuleringsprogram, där Enorm och VIP+ är två av de mest använda i Sverige.

Beräknad energianvändning stämmer sällan överrens med faktisk energianvändning. Den faktiska användningen är ofta betydligt högre än den beräknade, uppskattningsvis är den egentliga användningen 30-40 % högre än den beräknade.⁹ En förklaring till den stora skillnaden är att beräkningarna ofta primärt görs för att visa att dagens byggregler, med krav på isolergrad, uppfylls istället för att försöka beräkna den faktiska energianvändningen. De nya föreslagna byggreglerna ställer istället krav på byggnadens totala energianvändning vilket även ska verifieras med mätningar.

En annan viktig förklaring till skillnad mellan faktisk och beräknad energianvändning är användning av schabloner. Då många av energiberäkningens parametrar är svåra att beräkna uppskattas de istället ofta genom att införa schabloner. Dessa ska ge ett grovt genomsnittligt värde på parametrarna och finns utarbetade hos Boverket¹⁰ och hos många byggföretag. Om schablonerna är en ungefärlig spegling av verkligheten borde energiberäkningarna överensstämma ganska väl med energianvändningen i realiteten. Nyttjandet av schablonvärden tenderar dock ofta till att underestimera energianvändningen, detta genom att använda vissa schabloner som inte har någon verklighetsförankring. Det är till exempel att ansätta innetemperaturen till 20°C trots att den faktiska genomsnittstemperaturen i undersökningar ligger runt 22°C¹¹ (för flerbostadshus). Då en grads temperaturökning ökar den totala energianvändningen med ca 5 %¹² resulterar ett schablonvärde på 20°C i en stor felmarginal.

Idag finns det endast ett fåtal studier där den faktiska energianvändningen jämförs med den beräknade. Detta kan förklaras med att det ännu inte finns några verifieringskrav för att visa att den beräknade energianvändningen överensstämmer med verkligheten. Ett par nyare studier finns dock:

⁹ Köhler, Niclas. *Byggherrar räknar fel på energiförbrukningen*.

¹⁰ Boverket. *Termiska beräkningar*.

¹¹ ELIB. *Bostadsbeståndets inneklimat*.

¹² Elmrot, Arne. *Energianvändning i teori och praktik*.

- *Orsaker till differenser mellan beräknad och faktisk energianvändning i nyproducerade flerbostadshus*, ett examensarbete från KTH där faktisk och beräknad energianvändning jämförs för 4 nya flerbostadshus i Stockholm.¹³
- *Energianvändning i nybyggda flerbostadshus i Bo01-området i Malmö*, en licentiat avhandling från LTH som studerar den faktiska energianvändningen i byggnaderna och jämför värdena med de tidigare beräkningarna.¹⁴

I Stockholm visade sig den faktiska energianvändningen vara ca 25 % högre än beräknade värden. I undersökta byggnader på Bo01-området i Malmö visar sig de flesta fastigheter ha en faktisk energianvändning 40-60 % över den beräknade. Fastigheternas energianvändning var i snitt 186 kWh/m² för bostäder utan värmeåtervinning och 127 kWh/m² för bostäder med värmeåtervinning. Detta ska jämföras med målen från kvalitetsprogrammet för Bo01-området, där målet var att energianvändningen i fastigheterna genomsnittligen inte skulle överstiga 105 kWh/m².

I ett försök att hantera de osäkra elementen i energiberäkningarna gjordes en omfattande studie i Norge i slutet av 90-talet i Trine Dyrstad Pettersens doktorsavhandling *'Uncertainty analysis of energy consumption in dwellings'*. Osäkerheter i energiberäkningens delposter analyserades separat, för att sedan resultera i ett intervall där den faktiska energianvändningen med en viss säkerhet borde hamna. Liknande försök har även gjorts i Sverige, framför allt i Christer Harryssons avhandling *'Småhusets energiomsättning - Analys med särskild hänsyn till ingående delposters variationer'*.

2.2 Nya regler

2.2.1 Boverkets Byggregler

Boverket är den nationella myndighet som har ansvar för byggsektorn. Boverket ansvarar för den centrala administrationen av statliga bidrag för finansiering av bostäder och handhar regler för byggnader och konstruktioner i *Boverkets byggregler* och i *Boverkets konstruktionsregler*.¹⁵

I Boverkets nuvarande byggregler för energihushållning ställs främst krav på byggnadens energiförluster. Dessa är utformade som minimikrav på klimatskärmens värmeisolering.¹⁶ För att tydligare styra mot lägre energianvändning i byggnader har Boverket lagt fram remissförslag med krav på byggnadens energiprestanda, uttryckt i maximalt tillåten energianvändning per areaenhet och år.

¹³ Hagengran, Per och Stenberg, Karl. *Orsaker till differenser mellan beräknad och faktisk energianvändning i nyproducerade flerbostadshus*.

¹⁴ Nilsson, Annika. *Energianvändningen i nybyggda flerbostadshus på Bo01-området i Malmö*.

¹⁵ Boverket. *Om Boverket*, Internet.

¹⁶ Boverket. *Boverkets byggregler*. Kap. 9

Bostäder skall vara utformade så att byggnadens energibehov/användning högst uppgår till 110 kWh per m² (A_{temp}) i klimatzon söder¹⁷ och 130 kWh per m² i klimatzon norr.¹⁸

Kravet avser årligt energibehov vid normalt brukande av byggnaden. I rapporten betecknas maximalt tillåtet energibehov i respektive klimatzon med $Q_{BBR} \cdot A_{temp}$ är golvarean i temperaturreglerade utrymmen avsedd att värmas till mer än 10°C och som begränsas av klimatskärmens insida. Garage ingår inte i golvarean. Kravet är normalårskorrigerat, dvs. anpassat till den faktiska temperaturen för det aktuella året.

Kravet ska verifieras genom både mätning och beräkning, därför fodras att mätinstrument installeras. Kommunerna kommer att bli tillsynsmyndighet och är således den myndighet som utfärdar sanktioner. Hur eventuella sanktioner kommer vara utformade är idag oklart.¹⁹

I remissförslaget för byggnadens energibehov ingår inte hushållselen, som är den el som används till vitvaror, brunvaror och belysning inne i bostäderna. Detta motiveras med att denna post är svår för fastighetsägare och byggherrar att påverka.

2.2.2 EU: Energideklarering av byggnader

I ett EU-direktiv om byggnaders energiprestanda föreslås obligatoriska energideklarationer för byggnader. Direktivet är en del i EU:s åtgärder för att uppfylla Kyotoprotokollet och syftar till att effektivisera energianvändningen. I Sveriges statliga utredning föreslås att direktivet implementeras i en ny lag om energideklaration av byggnader med start år 2006.²⁰

I direktivet är fastighetsägare skyldiga att, m h a en energiexpert, upprätta en energideklaration när en byggnad ska uppföras, säljas eller byggas ut. Energideklarationen ska ange byggnadens energibehov vid normalt bruk. Fastighetsägaren kommer att få rekommendationer med lönsamma energibesparande åtgärder.²¹

Energiprestandan kommer beräknas med metod enligt Europeiska standardiseringskommittén (CEN-standard) för att enkelt kunna jämföra byggnader inom EU. Den beräknade energiprestandan kommer att verifieras med den uppmätta energiprestandan. Därefter upprättas ett energicertifikat, där byggnaden klassificeras efter energianvändning och typ av energi.²²

¹⁷ Klimatzon norr utgörs av Norrbottens län, Västerbottens län, Jämtlands län, Västernorrlands län, Gävleborgs län, Dalarnas län och Värmlands län. Klimatzon söder utgörs av övriga län.

¹⁸ Boverket. *Remiss: Förslag till revidering av Boverkets Byggregler*. Kap. 9

¹⁹ Johansson, Peter & Lundström, Mats. *Nya Byggregler*.

²⁰ EU-upplysningen. *Byggnaders energiförbrukning ska deklarerars*.

²¹ Nyman, Bengt. *Energideklarering av byggnader*.

²² CEN. *Energy performance of buildings*.

Bakgrund

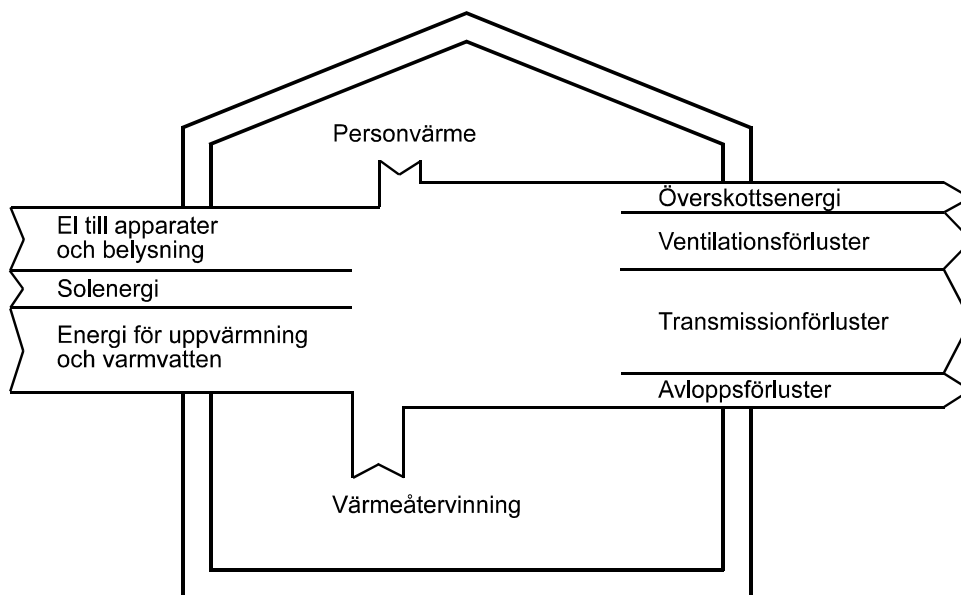
Lagförslaget har ett tydligt konsumentperspektiv, det ska vara enkelt för presumtiva köpare och hyresgäster att få grepp om byggnadens faktiska energianvändning.

3 Energianvändning i bostadshus

I kapitlet ges först en överskådlig bild av energianvändningen i bostadshus och en generell beskrivning av energibalansens delposter. Efter det följer en mer detaljerad beskrivning och definition av energibalansen och av delposternas ekvationer.

3.1 Översikt

I en byggnad ställs krav på många funktioner: innetemperaturen ska hållas vid en önskad nivå, tillräckligt med frisk luft ska finnas, apparater och belysning ska fungera och varmvatten ska finnas tillgängligt. För att den önskade innemiljön ska kunna erhållas krävs tillförsel av energi för att värma byggnaden, för att driva luftväxlingen och värma den kalla tilluften, för att värma varmvattnet och för att förse apparater och belysning med el. Energi lämnar byggnaden genom klimatskalet (alla väggar, tak, grunder, fönster och anslutningar som omsluter byggnaden), med den varma luften som ventileras ut och med det ljumna avloppsvattnet. Tillförseln av energin sker via byggnadens värme- och varmvattensystem, via el till belysning och apparater och genom solinstrålning och personvärme. Energi kan återföras genom att återvinna värmen i ventilationsluften och avloppsvattnet. Figur 3.1 visar en schematisk bild över energiflödena i ett bostadshus.



Figur 3.1: Energiflöden i bostadshus.²³

²³ Nilsson, Annika. *Energianvändningen i nybyggda flerbostadshus på Bo01-området i Malmö.*

Då värme inte ackumuleras i eller försvinner från byggnaden (genom att resultera i högre eller lägre inomhus temperatur) är energiflödena i balans. Energibalansen beskrivs av det enkla sambandet i ekvation 3.1.

$$Q_{in} = Q_{ut}$$

Ekvation 3.1 *Energibalans ekvation*

Q_{in} är den energi som behövs för att täcka förlusterna i form av transmission, avloppsförluster och ventilationsförluster. Då tillskottet av energi är större än det faktiska behovet bildas överskottsenergi i form av värme. Överskottsenergin hanteras ofta genom att vädra ut den oönskade värmen eller skugga fönsterytor för att minimera soltillskottet.

Energibalansens delposter kan analogt med figur 3.1 delas upp i tillskott och förluster enligt:

Tillskott	Förluster
Värme till uppvärmningssystem	Transmissionsförluster
Värme till tappvarmvatten	Ventilationsförluster
Solenergi	Läckageförluster
Personvärme	Avloppsförluster
El till apparater och belysning	Överskottsvärme
Värmeåtervinning	

3.1.1 Tillskott

En byggnad tillförs värme både genom s.k. aktiv och passiv uppvärmning. Den aktiva uppvärmningen är värmen till uppvärmningssystemet; den köpta värmeenergi som behövs för att hålla innetemperaturen vid en önskad nivå under den kalla årstiden. Uppvärmningssystemet utgörs oftast av ett vattenburet radiatorsystem. Värme åtgår även till att värma den inkommande, kalla ventilationsluften. Den passiva uppvärmningen utgörs av s.k. tillskottsvärme som härrör från solen och de aktiviteter som försiggår i byggnaden. Tillskottsvärmen benämns även internlast eller 'gratis värme' och består av spillvärme från apparater, belysning, distributionssystemet av värme/varmvatten, personvärme och solinstrålning. En stor del av spillvärmen från elektriciteten till belysning, vitvaror och andra apparater bidrar till att värma huset. Även distributionssystemet "läcker" värme i rör och andra anordningar. Personvärmen beror på hur många personer som finns i byggnaden och hur aktiva de är. Solinstrålningens betydelse beror av fönstrens riktning, skuggning och storlek, samt byggnadens geografiska placering.²⁴

Elen till belysning och apparater delas vanligen upp i hushållsel och fastighetsel. Hushållselen är den el som går åt att driva vitvaror, belysning och övriga apparater i bostäderna/lägenheterna. Hushållselen betalas oftast direkt av brukaren. Fastighetselen utgörs av el till hissordningar, gemensam belysning och tvättstugor,

²⁴ Warfvinge, Catarina. *Installationsteknik AK för V*. Kap 6.

fläktar och pumpar för installationssystem. Fastighetselen betalas oftast av ägaren/hyresvärden.

Värme till tappvarmvattnet är den köpta energi som behövs för att värma vattnet, och beror på mängden och temperaturen på tappvarmvattnet, samt på kallvattnets temperatur.

Genom att återvinna värme från den varma ventilationsluften och/eller avloppsvattnet minskas behovet av köpt energi till uppvärmnings- och/eller varmvattenssystemet. Detta sker genom att installera en värmepump eller värmeväxlare, som kan återföra värme till uppvärmningssystemet eller värma den inkommande ventilationsluften/kallvattnet.

3.1.2 Förluster

Med transmissionsförluster avses värmeflöde över klimatskalet som beror på att det finns en temperaturgradient mellan insidan och utsidan på skalet. Transmissionen är linjärt beroende av skillnaden mellan utomhustemperaturen och inomhustemperaturen, ju större gradienten är desto större blir förlusterna. Transmissionen beror också på värmemotståndet i klimatskalet, dvs. isoleringsgraden. Bättre isolering betyder högre värmemotstånd och ger lägre transmissionsförluster. Som ett mått på värmemotståndet används värmegenomgångstalet, som är inversen av klimatskalets värmemotstånd. Ju lägre värmegenomgångstalet är, desto bättre är alltså isoleringen. Köldbryggor uppstår där värmegenomgångstalet genom klimatskalet lokalt är högre än i omgivande byggnadsdel. Dessa utgör ofta en betydande del av transmissionsförlusterna. Hörn fungerar alltid som en köldbrygga, då de har större yta mot den lägre utetemperaturen än den högre innetemperaturen. Köldbryggor uppstår även vid anslutningar där isolationsskiktet tunnats ut för att ge plats åt infästningen, som vid fönsterkarmar, balkonger och bjälkar.²⁵

Ventilationsförluster uppstår då varm inomhusluft ersätts med kall. Ju större temperaturskillnaden är mellan uteluften och inneluften, desto större blir förlusterna. Byggnaders ventilationssystem kan utformas på många olika sätt. I äldre hus är självdrag vanligt, där uppvärmd luft strömmar in genom otätheter och uteluftsventiler. Nyare byggnader har oftast mekanisk styrd ventilation, där fläktar för bort frånluften och ibland även pumpar in i förväg uppvärmd tilluft.²⁶ För att kunna återvinna värmen i frånluften krävs mekanisk styrd ventilation.

Läckageförluster uppstår då kall luft läcker in genom små håligheter i klimatskärmen. Dessa beror på hur tätt klimatskalet är och kan uppskattas genom att utföra tryckprov över skalet. Luftläckaget kan ses som en okontrollerad eller ofrivillig ventilation och kan således beräknas analogt med ventilationsförlusterna. Vädring genom öppna

²⁵ Warfvinge, Catarina. *Installationsteknik AK för V*. Kap. 6

²⁶ Ibid. Kap. 7

fönster utgör också ett okontrollerat luftflöde. Vädringen varierar kraftigt med brukarnas beteende.²⁷

Värmebehovet till tappvarmvattnet beror på mängden och temperaturen på tappvarmvattnet, samt på vattnets temperatur innan uppvärmning. Denna energi lämnar byggnaden med det ljumna avloppsvattnet. Avloppsförlusterna kan minskas genom återvinning med värmeväxlare. En del av värmebehovet till tappvarmvattnet kommer byggnaden tillgodo genom spillvärme och återfinns under tillskottsposten. Den största delen av varmvattenanvändningen sker i badrum där ventilationen är hög. Större delen av värmen sprids därför inte till övriga byggnaden.

3.2 Energibalans

Energibalansen kan definieras på olika sätt. Rapporten utgår från Boverket definition som beskriver byggnaders köpta energibehov enligt ekvation 3.2.

$$Q_{\text{energi}} = Q_{\text{trans}} + Q_{\text{vent}} + Q_{\text{läck}} + Q_{\text{rvv}} + Q_{\text{dr}} + Q_{\text{fhet}} - Q_{\text{tillskott}} - Q_{\text{åter}} \quad [\text{kWh/m}^2]$$

*Ekvation 3.2 Byggnaders energibehov*²⁸

Q_{energi}	Beräknat normalårsbaserat behov av köpt energi vid normalt brukande av byggnaden
Q_{trans}	Transmissionsförluster inklusive köldbryggor
Q_{vent}	Ventilationsförluster
$Q_{\text{läck}}$	Luftläckageförluster, kall luft som läcker in/varm luft som läcker ut
Q_{rvv}	Värmebehov för tappvarmvattnet
Q_{dr}	Distributions och reglerförluster
Q_{fhet}	Fastighetsel
$Q_{\text{tillskott}}$	Värmetillskott från personer, solinstrålning och spillvärme från belysning och apparater samt från produktion och distribution av värme- och tappvarmvattensystemet
$Q_{\text{åter}}$	Värme som kan återvinnas från ventilationsluften och avloppsvattnet, samt energi från solceller, solfångare eller dyl.

Enligt definitionen är energianvändningen normalårskorrigerad och angiven i kWh per kvadratmeter och år. Normalårskorrigerade värden betyder att värdena justeras till ett ”normalår”, där uteklimatet är detsamma som medelvärdet. Detta görs för att rättvist kunna jämföra kallare och varmare år med varandra.²⁹

Då energianvändningen anges ”per kvadratmeter” är det mycket viktigt att definiera vilken area som avses. I studien avses bruksarean (BRA) som i stort sätt motsvarar

²⁷ Nordquist, Birgitta. Personlig kommunikation.

²⁸ Boverket. *Remiss: Förslag till revidering av Boverkets Byggregler*. Kap. 9

²⁹ Schultz, Linda. *Normalårskorrigerad energianvändning i byggnader*.

hela den uppvärmda ytan som begränsas av ytterväggarnas insida med avdrag för vissa schakt och innerväggar.

I Boverkets energibalans är Q_{energi} det årliga behovet av köpt energi vid *normalt bruk*. Detta betyder att brukaren antas vara en genomsnittsbbrukare och att kravet på maximal tillåten energianvändning gäller för byggnader med ”genomsnittsbbrukare”. I studien diskuteras energianvändning för både genomsnittsbbrukare och faktiska brukare vidare i kapitel 3.3 och 7.3.

I Boverkets energibalans ingår inte den köpta hushållselen i beräkningarna. Detta motiveras med att brukaren oftast själv står för kostnaderna och att denna post är svår för fastighetsägaren att påverka. Byggnadens totala behov av köpt energi är följaktligen summan av Q_{energi} och hushållselen.

3.2.1 Transmission

Transmissionen är linjärt beroende av temperaturdifferensen innanför och utanför klimatskalet, klimatskalets yta i förhållande till golvytan samt värmemotståndet i klimatskalet:

$$Q_{\text{trans}} = \sum (U \cdot A) \cdot (T_i - T_u) \cdot t + Q_{\text{köldbryggor}} \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.3 *Transmissionsförluster*³⁰

U	Värmegenomgångskoefficient	[W/m ² K]
A	Area klimatskal/ Area golvyta	
T_i	Innetemperaturen	[°C]
T_u	Utomhustemperaturen	[K]
t	Tid	[s]

$Q_{\text{köldbryggor}}$ kan beräknas som en procentsats av den övriga transmissionen, eller som en funktion av linjära och punktformiga köldbryggor.³¹ Ofta beräknas en genomsnittlig värmegenomgångskoefficient för hela byggnadens klimatskal, där även köldbryggor ingår. Ekvationen kan då förenklas till

$$Q_{\text{trans}} = U_m \cdot A \cdot (T_i - T_u) \cdot t \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.4 *Transmissionsförluster*

U_m	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient	[W/m ² K]
-------	--	----------------------

I studien används den förenklade ekvationen.

³⁰ Nilsson, Annika. *Energianvändningen i nybyggda flerbostadshus på Bo01-området i Malmö*.

³¹ Boverket. *Boverkets byggregler*. Kap. 9

3.2.2 Ventilation och läckage

Ventilationsförlusterna beror av luftflödet samt av temperaturdifferensen mellan den luft som ventileras in och den luft som ventileras ut. Den luft som ventileras in, tilluften, kan antas ha samma temperatur som uteluften. Den luft som ventileras ut, frånluften, antas ha samma temperatur som innetemperaturen. Även om luften förvärms innan den släpps in i byggnaden blir den totala energiåtgången densamma. Om uppvärmningen sker med värmeåtervinning kommer denna energibesparing in under återvinningsposten.

$$Q_{vent} = q_{vent} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_u) \cdot t \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.5 Ventilationsförluster³²

q_{vent}	Ventilationsflöde	$[\text{m}^3/\text{s}]$
ρ	Luftens densitet	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
c_p	Luftens värmekapacitet	$[\text{J}/\text{kg},\text{K}]$

Läckageförlusterna kan beskrivas som ett okontrollerat luftflöde. Även vädringstillskottet inkluderas i denna post. De beräknas analogt med ventilationsförlusterna:

$$Q_{läck} = q_{läck} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_u) \cdot t \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.6 Läckageförluster

$q_{läck}$	Läckageflöde inklusive vädring	$[\text{m}^3/\text{s}]$
------------	--------------------------------	-------------------------

3.2.3 Varmvatten

Värmebehovet till varmvattnet beror av varmvattenanvändningen och temperaturdifferensen mellan det varma vattnet och vattnet innan uppvärmning. Avloppsförlusterna är i princip värmebehovet till tappvarmvattnet subtraherat eventuell återvinning och spillvärme.

$$Q_{tvv} = c_v \cdot m_{tvv} \cdot (T_{tvv} - T_{kv}) \cdot t \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.7 Värmebehovet till tappvarmvattnet³³

c_v	Vattnets värmekapacitet	$[\text{J}/\text{kg},\text{K}]$
m_{tvv}	Massa vatten som ska värmas	$[\text{kg}]$
T_{tvv}	Temperatur på tappvarmvattnet	$[\text{K}]$
T_{kv}	Temperatur på vattnet innan uppvärmning	$[\text{K}]$

³² Warfvinge, Catarina. *Installationsteknik AK för V*. Kap. 6

³³ Bagge, Elmrot, Lindtrii (2004). *Energianvändning och inneklimat i två energieffektiva småhus i Västra Hamnen i Malmö*. s. 46

3.2.4 Distributions- och reglerförluster

Distributionsförluster uppkommer i samband med transporter av varmvatten till kranar och värme till värmesystemet. Reglerförluster uppstår då värme och varmvattensystemen inte är tillbörligt justerade, t ex om utomhustermostaten som reglerar värmesystemet inte är tillförlitlig. Främst utgörs reglerförlusterna av en onödigt hög innetemperatur för att kompensera in fluktuationer i systemet. Storleken på förlusterna beror på hur värme- och varmvattensystemen är utformade: hur väl rören är isolerade, hur noga systemen är justerade osv.

3.2.5 Fastighetsel

Fastighetselen beror på hur många pumpar och fläktar som finns och hur energikrävande dessa är. Användningen av fastighetsel blir oftast högre om återvinningssystem finns, eftersom dessa är mer eller mindre elkrävande. Fastighetselen beror också på belysning i gemensamma utrymmen, hissar, om gemensam tvättstuga finns etc.

3.2.6 Återvinning

Värme kan återvinnas genom att ta till vara på värmen i utgående ventilationsluft eller avloppsvatten. Återvinning sker med en värmväxlare eller värmepump. För en värmväxlare beror återvinningen på växlarens temperaturverkningsgrad. Återvinningsposten är alltså en funktion av temperaturverkningsgraden och ventilations-/avloppsförlusterna.

$$Q_{\text{åter}} = v_{\text{vent}} \cdot Q_{\text{vent}} + v_{\text{tvv}} \cdot Q_{\text{tvv}} \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.9 Återvinning för värmväxlare

v_{vent} Verkningsgraden för ventilationens värmeåtervinning
 v_{tvv} Verkningsgraden för tappvarmvattnets värmeåtervinning

En värmepumps effektivitet anges oftast med värmefaktor. Den drivs med en viss mängd el, och värmefaktorn anger hur många gånger elen fås ut i värme. Om mängden el till pumpen är X J och värmefaktorn är 3 så producerar alltså pumpen $3X$ J, varav nettotillskottet är $2X$ J. Återvinningen blir således:

$$Q_{\text{åter}} = (v - 1) \cdot Q_{\text{driftel}} \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.10 Återvinning för värmepump

v Värmepumpens värmefaktor
 Q_{driftel} Värmepumpens driftel [kWh/m²]

3.2.7 Tillskott

Tillskottsvärmen utgörs av personvärme, solinstrålning och värmespill från hushållsapparater/belysning, från produktionen och distributionen av värme- och varmvattensystemet.

$$Q_{\text{tillskott}} = p_{\text{hhel}} \cdot Q_{\text{hhel}} + p_{\text{tvv}} \cdot Q_{\text{tvv}} + Q_{\text{person}} + Q_{\text{sol}} \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.11 Tillskottsvärme³⁴

p_{hhel}	Kvot av hushållselen som tillgodogörs som värmertilskott	
p_{tvv}	Kvot av energi till varmvatten som tillgodogörs som värmertilskott	
Q_{person}	Personvärme	$[\text{kWh/m}^2]$
Q_{sol}	Soltillskott	$[\text{kWh/m}^2]$

Hur mycket av hushållselen och energin till tappvarmvattnet som kan tillgodogöras som värme är både beroende av brukarnas beteende och byggnadens konstruktion. T ex kan belysning och brunvaror generera värme som kommer byggnaden tillgodo under uppvärmningssäsongen, medan värme som uppkommer vid matlagning ofta leder till övertemperaturer som vädras ut. Stora delar av varmvattnet förbrukas i badrum där luftutsuget är stort, stora delar av överskottsvärmen kommer därför inte övriga byggnaden tillgodo.

Tillskott av solvärme sker framförallt genom fönster. Soltillskottet är starkt beroende av fönstrets väderstreck och kan beräknas som en funktion av väderstreck, solinstrålning, soltransmission och glasarea.

$$Q_{\text{sol}} = \sum Q_{\text{ack}} \cdot A_{\text{glas}} \cdot g \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Ekvation 3.12 Soltillskott³⁵

Q_{ack}	Akkumulerad solinstrålning per kvm för aktuellt väderstreck	$[\text{kWh/m}^2]$
A_{glas}	Glasarean för aktuellt väderstreck	$[\text{m}^2]$
g	Soltransmissionen (som beror på fönsternas prestanda)	

3.3 Prestandaberoende och brukarberoende parametrar och dess varianser

Energianvändningen i ett hus kan sägas bero dels på hur huset är byggt och utrustat och dels på hur brukarna använder huset. De delar av energianvändningen som kan knytas till husets prestanda är framför allt isoleringsgraden, förekomsten av köldbryggor, ventilationsanordning, täthet i klimatskalet och kapacitet av återvinningssystem. Här kallas de prestandaberoende variabler. De brukarberoende parametrarna är främst innetemperaturen, användningen av varmvatten, el till apparater och belysning och tillskottsvärme från personer. Dessa benämns här brukarberoende parametrar.

I många fall är en parameters storlek beroende av både husets prestanda och användaren, t ex är el till vitvaror både beroende av vitvarornas prestanda och hur de används. I studien antas parametrarna antingen vara brukarberoende eller

³⁴ Boverket. *Boverkets byggregler*. Kap. 9

³⁵ Bülow-Hübe, Helena. Personlig kommunikation.

prestandaberoende. I de fall som parametern är beroende av både prestanda och brukare tillfaller parametern den kategori som påverkar parametern mest. En uppdelning av energibalansens parametrar följer i tabell 3.1.

Tabell 3.1 *Prestandaberoende och brukarberoende parametrar.*

Prestandaberoende parametrar	Brukarberoende parametrar
Värmeenergimängd Ventilationsflöde Läckageflöde Drift och reglerförluster Fastighetsel Soltillskott Värmetillskott från el och varmvatten Återvinning	Innetemperatur Vädringsflöde Varmvattenanvändning Hushållsel Personvärme

Från samhällets och byggherrars sida är det enklare att påverka en byggnads energianvändning genom att påverka de parametrar som kan knytas till husets prestanda. Detta kan ske genom att ställa krav på isoleringsgrad, bestämma ventilationssystem, välja återvinningsgrad osv. De brukarberoende parametrarna är svårare att påverka utifrån, brukaren bestämmer ofta själv innetemperatur, hur mycket varmvatten som ska användas osv. Det går dock att i viss utsträckning styra brukaren mot lägre energianvändning genom att introducera individuell mätning och debitering av värme och varmvatten, genom att ha ett bra reglersystem och genom att informera brukaren om hur man kan optimera energianvändningen.

Samtliga parametrar innehåller osäkerheter av olika slag. Här ges några exempel på hur dessa kan uppstå:

- Osäkerheter i prestandaberoende parametrar:
 - huruvida köldbryggor har undvikits vid projektering och byggnation
 - förekomst av driftförluster pga. värmesystemets och varmvattensystemets utformning
 - förluster knutna till reglersystemet
 - återvinningsystemets verkliga verkningsgrad
- Osäkerheter i brukarberoende parametrar
 - val av innetemperatur
 - vädringsbeteende
 - användning av varmvatten
 - bruk av apparater och belysning

I många fall beräknas energianvändningen för byggnaden vid normal drift. Detta betyder att man utgår från en ”standardbrukare” i beräkningarna. Standardbrukaren kan ses som en genomsnittlig energianvändare: valet av innetemperatur är genomsnittlig temperatur, varmvattenanvändningen är genomsnittlig osv. Denna energianvändning brukar kallas referensdrift. Om alla brukarberoende parametrar sätts till parametrarnas verkliga genomsnitt borde referensdriften i genomsnitt spegla den verkliga energianvändningen. I många fall används dock schablonvärden för de

brukarberoende parametrarna. Som diskuterats i kapitel 2.1 är dessa inte alltid anpassade efter verkliga förhållanden. Resultatet blir energiberäkningar som inte speglar den faktiska energianvändningen.

Då energianvändningen beräknas för faktiska brukare talar man om aktuell drift. För den aktuella driften beaktas osäkerheter och differenser med som kan kopplas både till de faktiska brukarna och till husets prestanda. Här går det inte att använda schabloner, istället identifieras de faktiska brukarna: utgörs de av barnfamiljer/äldre/studenter, är byggnaden en hyresrätt eller bostadsrätt osv. Den aktuella driften innehåller fler osäkra element än referensdriften.

I studien analyseras även drift för ett ”normalhus” där det antas att husets prestanda inte varierar. Här är det bara de brukarberoende parametrarna som är osäkra. Denna drift kallas i rapportern för brukardrift.

4 Statistik

Då partialkoefficientmetoden bygger på sannolikhetsteoretiska analyser ges här en överblick av den statistikteori som används. Vidare diskuteras även bakgrunden till studiens simuleringsmetod, Monte Carlo simulering.

4.1 Översikt

Traditionella energiberäkningar är deterministiska, dvs. de antar ett absolut värde. Även energiberäkningens delposter (såsom innetemperatur och varmvattenanvändning) behandlas som deterministiska. Detta betyder att delposternas eventuella variationer och osäkerheter ignoreras. Värdena av delposterna väljs antingen genom uppskattningar/schabloner eller sätts till det genomsnittliga värdet från ett antal observationer.

Om delposterna inte antar ett fixt värde, utan antas återfinnas i ett intervall kallas de stokastiska eller slumpmässiga. Intervallet kallas variabelns utfallsrum och den stokastiska variabeln betecknas X . Variabeln har alltså inget orubbligt värde, utan kan beskrivas med *medelvärde, varians, standardavvikelse, variationskoefficient, täthets- och fördelningsfunktion.*

Medelvärde, μ

Medelvärdet är ett mått på fördelningens vägda genomsnitt. Om t ex en last är en stokastisk variabel så kan medelvärdet beskrivas som det värde där massan ligger i genomsnitt. Matematiskt kan detta beskrivas:

$$\mu = \sum x_j \cdot p(x_j)$$

där x_j är ett värde och $p(x_j)$ är sannolikheten för att x_j ska uppträda.

Varians, V

Variansen beskriver variabelns spridning och kallas även väntevärde. Variansen beskriver genomsnittligt avstånd från ett slumpat värde till medelvärdet och definieras:

$$V(X) = E[(X - \mu)^2]$$

Standardavvikelse, σ

Standardavvikelse är kvadratroten ur variansen och används ofta eftersom den har samma dimension som den stokastiska variabeln och medelvärdet.

Standardavvikelsen betecknas σ och definieras:

$$\sigma = \sqrt{V(X)}$$

Variationskoefficient, $R(X)$

Variationskoefficienten är kvoten mellan standardavvikelsen och medelvärdet och används för att kunna jämföra variabilitet mellan olika stokastiska variabler.

Variationskoefficienten är dimensionslös och definieras:

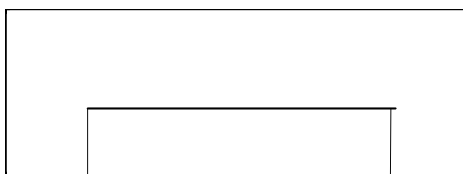
$$R(X) = \frac{\sigma}{\mu}$$

Ju högre värde variationskoefficienten har, desto större är spridningen. Ju större spridningen är, desto svårare är det att bestämma värdet för en variabel. Stor spridning betyder alltså större osäkerhet i bestämning av en variabel.

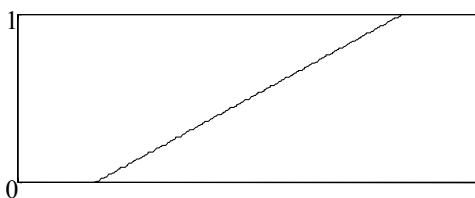
Täthets- och fördelningsfunktion

Täthets- och fördelningsfunktioner används för att på ett koncist sätt beskriva hur en stokastisk variabel varierar. Funktionerna gör det även möjligt att hantera fördelningarna matematiskt. Täthetsfunktionen beskriver hur variabeln är fördelad i utfallsrummet. Visuellt kan täthetsfunktionen ses som en plottning av en oändlig mängd observationer av variabeln. Fördelningsfunktionen är en ackumuleringsfunktion som beskriver sannolikheten för att variabeln ska vara mindre eller lika med ett visst värde, t ex hur stor sannolikheten är att få ett tal som är mindre eller lika med 3 då man kastar en tärning.

En stokastisk variabels fördelning antar ofta mönster som kan delas in i standardfördelningar. Dessa kan definieras och beskrivas matematiskt. Nedan följer en kort beskrivning av de vanligaste fördelningarna.



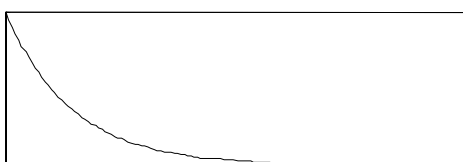
Täthetsfunktion



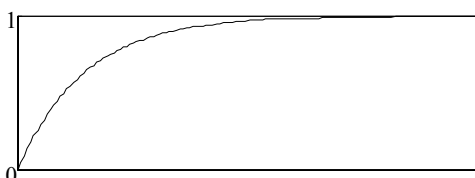
Fördelningsfunktion

Likformig fördelning

I en likformig fördelning är sannolikheten för att den stokastiska variabeln antar ett visst värde densamma för alla värden i intervallet. Ett exempel på likformig fördelning är kast med en tärning, där sannolikheten är lika stor att resultatet blir 1, 2, 3, 4, 5 eller 6.



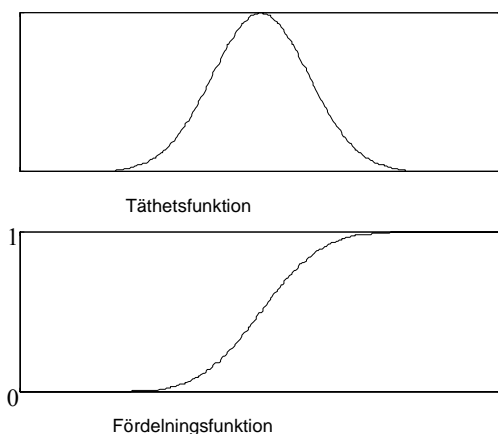
Täthetsfunktion



Fördelningsfunktion

Exponentialfördelning

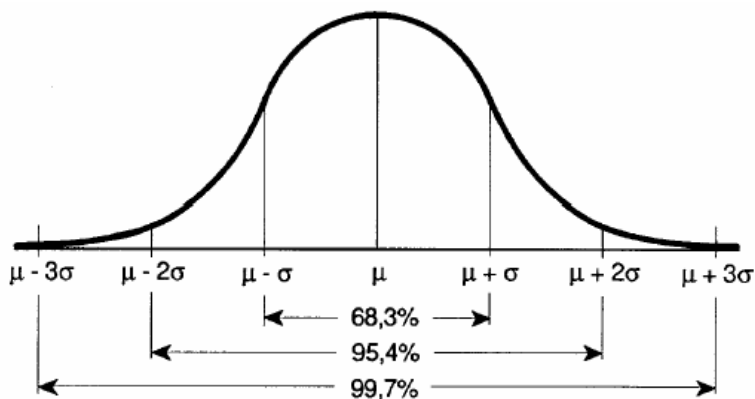
Exponentialfördelningen avtar exponentiellt, och är alltid noll då den stokastiska variabeln är negativ. Exponentialfördelningen beskriver många kemiska förlopp, t ex nedbrytning av radioaktiva ämnen.



Normalfördelning

Normalfördelningen är den vanligast förekommande fördelningen och beskriver en mängd naturliga och artificiella företeelser. Täthetsfunktionen är klockformad och dess kurva är centrerad kring medelvärdet, med två spegelvända kurvor på vardera sida.

I normalfördelningen täcks 99,7 % av fördelningen inom 6 standardavvikelser, se figur 4.1.



Figur 4.1 Samband mellan standardavvikelse och fördelning för normalfördelad variabel.

Centrala gränsvärdessatsen

Centrala gränsvärdessatsen säger att summan av oberoende likafördelade stokastiska variabler med godtycklig fördelning är ungefär normalfördelad. Ju fler variabler som adderas, desto mer lik normalfördelningen blir summan. Satsen visar också att summan av normalfördelade variabler alltid är exakt normalfördelad. Detta, tillsammans med det faktum att normalfördelningen är vanligt förekommande, gör att normalfördelningen intar en särställning inom statistikteorin.

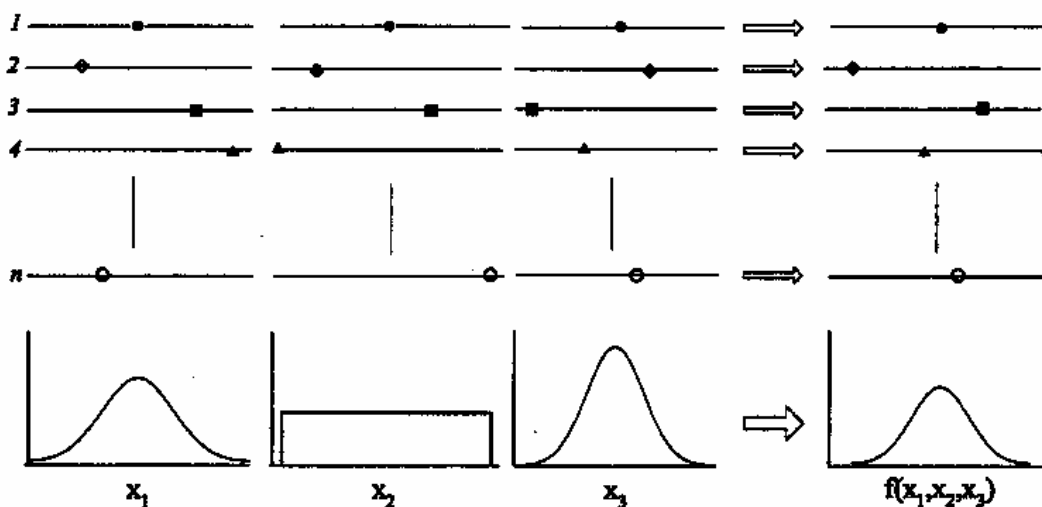
Kovarians och korrelationskoefficient

Kovariansen beskriver beroendet mellan olika stokastiska variabler. I de fall då en ökning av en variabel genererar ökning i en annan variabel talar man om positiv kovarians. Då ökningen resulterat i en minskning hos den andra variabeln är kovariansen negativ. Korrelationskoefficienten är ett dimensionslöst värde på kovariansen, som alltid ligger mellan -1 och 1. Om korrelationskoefficienten är 1

betyder det total positivt beroende mellan två variabler medan korrelationskoefficienten -1 betyder total negativt beroende.³⁶

4.2 Monte Carlo simulering

Monte Carlo simulering kan användas för att beräkna en funktion vars variabler är stokastiska. För varje simulering slumpas tal från samtliga variabler för att resultera i ett värde på funktionen. Simuleringen upprepas en mängd gånger och resulterar i en mängd värden på funktionen. Värdena på funktionerna kan sedan sammanfattas till en fördelning.³⁷ Metoden illustreras med ett exempel i figur 4.2.



Figur 4.2 Exempel på Monte Carlo simulering.

I exemplet är funktionen $f(x)$ beroende av tre stokastiska variabler: x_1 , x_2 och x_3 . För varje simulering slumpas ett värde fram för x_1 , x_2 och x_3 och resulterar i ett värde för funktionen $f(x)$. Simuleringen upprepas n gånger och resulterar i n slumpade värden på $f(x)$. De n stycken värdena är observationer av $f(x)$ och skattas sedan till en fördelning med medelvärdet μ_f och standardavvikelsen σ_f .³⁸

För att få ett tillförlitligt resultat krävs att simuleringen upprepas många gånger, antal simuleringar ligger vanligen i intervallet 10^3 till 10^6 .

³⁶ Blom, Gunnar. *Sannolikhetsteori och statistikteori med tillämpningar*.

³⁷ Melchers, Robert E. *Structural Reliability Analysis and Prediction*.

³⁸ Dyrstad Pettersen, Trine. *Uncertainty analysis of energy consumption in dwellings*.

5 Konstruktionsteknik

För att kunna tillämpa konstruktionsteknikens tillförlitlighetsanalys på energiberäkningar krävs god kunskap om konstruktionsteknikens bakomliggande teori. Här ges en teoretisk bakgrund till dimensionering med tillförlitlighetsanalys i allmänhet, och partialkoefficientmetoden i synnerhet. Vidare ges en översikt till utförande av känslighetsanalys.

Konstruktionsteknik behandlar metoder och principer för att konstruera byggnader, broar och andra typer av anläggningar. Stor vikt läggs vid att bestämma dimensionerna så att konstruktionerna kan uppfylla ställda funktionskrav. Dimensionsberäkningar anger vilka mått och dimensioner konstruktionen måste ha för att med stor säkerhet inte bryta samman. Eftersom konsekvenserna av en feldimensionerad konstruktion kan bli mycket allvarliga finns väl utvecklade metoder för att säkerställa att konstruktionen blir tillräckligt tålig.

5.1 Dimensionering med tillförlitlighetsanalys

Vid dimensionering av bärande konstruktioner med tillförlitlighetsanalys beaktas både de påfrestningar som verkar på konstruktionen och konstruktionens bärförmåga. Påfrestningarna kallas även lasteffekt och betecknas med S . Bärförmågan betecknas med R . För att konstruktionen inte ska kollapsa får inte påfrestningarna överskrida bärförmågan. Detta villkor är fundamentalt och kallas i studien konstruktionens grundvillkor:

$$R \geq S$$

Ekvation 5.1 Grundvillkor

Gränstillståndet är då bärförmågan är lika stor som påfrestningarna och skrivs:

$$R - S = 0$$

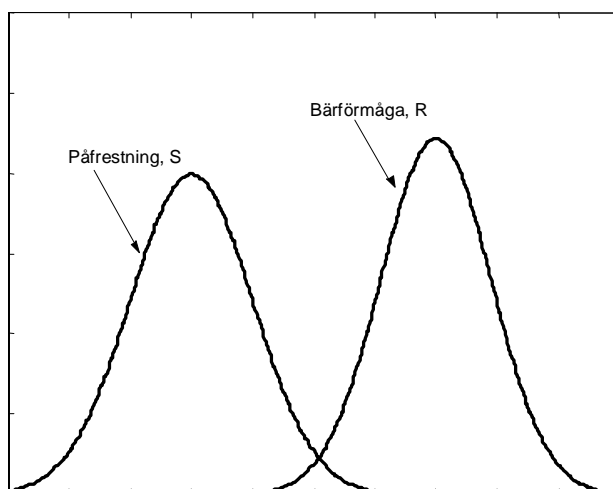
Ekvation 5.2 Gränstillstånd ³⁹

Gränstillståndet kan gälla för både *bruksgränsen* och *brottsgränsen*. Bruksgränsen är den gräns som försäkrar god funktion och ställer krav för deformationer och störningar (sprickor, svängningar, svikt etc.). Då bruksgränsen överskrids kan konstruktionen fortfarande vara relativt intakt, men dess funktionskrav är inte längre uppfyllda. Funktionskraven varierar mellan olika konstruktioner och bestäms ofta av konstruktionens beställare. För ett bostadshus kan bruksgränsen t ex vara överskriden om sprickor uppkommer på väggar, om vatten läcker in i källaren eller om golvet sviktar. Brottsgränsen beskriver det tillstånd då konstruktionen eller delar av konstruktionen precis klarar påfrestningarna utan att bryta samman. Om brottsgränsen överskrids, dvs. om påfrestningarna överskrider bärförmågan kommer konstruktionen

³⁹ Isaksson, Tord, Mårtensson, Annika och Thelandersson, Sven. *Grunderna i Byggekonstruktion*.

att kollapsa. Brottsgränsen försäkras alltså mot kollaps och är den kravgräns som används i Boverkets konstruktionsregler.⁴⁰ I studien syftar gränstillståndet på brottsgränsen och benämns konstruktionens brottsekvation.

Dimensioneringen sker i regel med hjälp av beräkningsmodeller för påfrestningar och bärförmåga, där de grundläggande variablerna är laster, materialegenskaper och geometriska storheter (vinklar, längder, balkars placering etc.). Det är inte möjligt att helt säkert bestämma variablerna, t ex vilka laster som kommer att verka på konstruktionen eller exakt hur hållfast ett material är. Beräkningsmodellerna är inte en exakt beskrivning av verkligheten. Osäkerheter återfinns därför dels i de antagna värdena för laster och materialegenskaper, dels i själva beräkningsmodellerna.⁴¹ Eftersom både variabler och beräkningsmodeller är osäkra kan varken bärförmågan eller påfrestningar beräknas till ett absolut tal. De kan istället uppskattas i ett intervall. Detta illustreras i figur 5.1 där både lasteffekt och bärförmåga är normalfördelade.



Figur 5.1 Täthetsfunktion för påfrestning och bärförmåga.

Risken för att grundvillkoret $R \geq S$ inte uppfylls beror på hur osäkra förutsättningar som beräkningarna grundas på:

- Sannolikheten att de antagna påfrestningarna överskrider
- Sannolikheten att den beräknade bärförmågan underskrider

Eftersom både antagna variabler och modeller är osäkra går det aldrig att garantera att gränstillståndet inte överskrider. Boverkets konstruktionsregler ställer istället krav på att grundvillkoret $R \geq S$ ska uppfyllas *med en betryggande säkerhet*. Vad som anses vara betryggande säkerhet fastställs i konstruktionsreglerna, där olika typer av

⁴⁰ Boverket. *Regelverk för konstruktioner*. Kap. 3

⁴¹ Isaksson, Tord, Mårtensson, Annika och Thelandersson, Sven. *Grunderna i Byggkonstruktion*.

konstruktioner har olika säkerhetsnivåer. Säkerhetsnivåerna är uttryckta som högsta tillåten brotts sannolikhet för att brottsgränsen ska överskridas och betecknas p_f . För t ex en bro är $p_f 10^{-6}/\text{år}$, d.v.s. sannolikheten för att ett brott kan inträffa får inte överskrida en på miljonen per år.⁴²

För att beräkna brotts sannolikheten kan hjälpfunktionen M införas. Antag att både bärförmåga och påfrestning är normalfördelade med fördelningarna:

$$R \in N(\mu_R, \sigma_R)$$

$$S \in N(\mu_S, \sigma_S)$$

Hjälpfunktionen är differensen mellan bärförmåga och påfrestning.

$$M = R - S$$

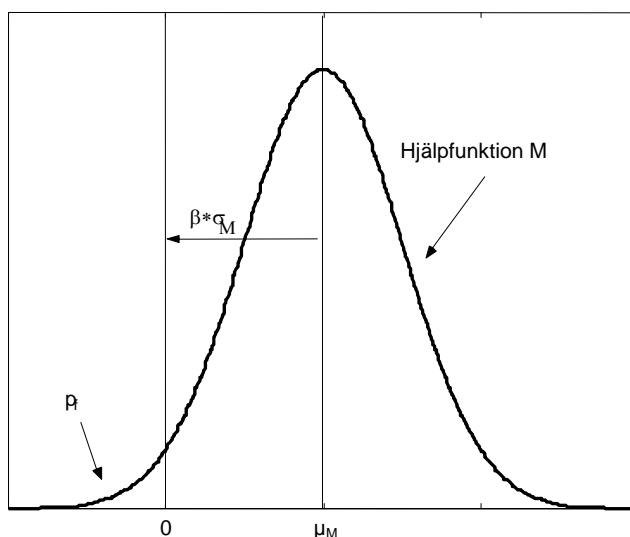
$$\mu_M = \mu_R - \mu_S$$

$$\sigma_M = \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)}$$

Ekvation 5.3 Hjälpfunktion⁴³

Brotts sannolikheten utgörs av integralen av hjälpfunktionens alla negativa värden. Som ett mått på säkerhetsnivå används säkerhetsindex β . Säkerhetsindex anger hjälpfunktionens avstånd från medelvärdet till skärningen på y-axeln multiplicerat med standardavvikelsen.

Hjälpfunktionen M och säkerhetsindex β illustreras i figur 5.2.

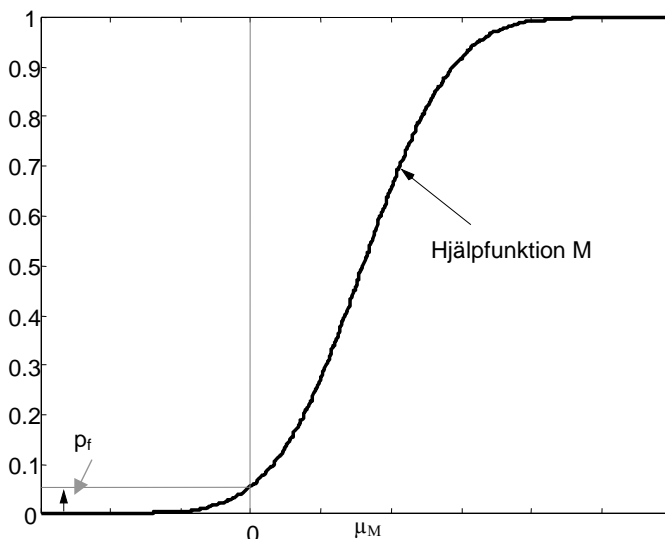


Figur 5.2 Täthetsfunktion för hjälpfunktion M och säkerhetsindex β .

⁴² Boverket. *Regelverk för konstruktioner*. Kap. 2

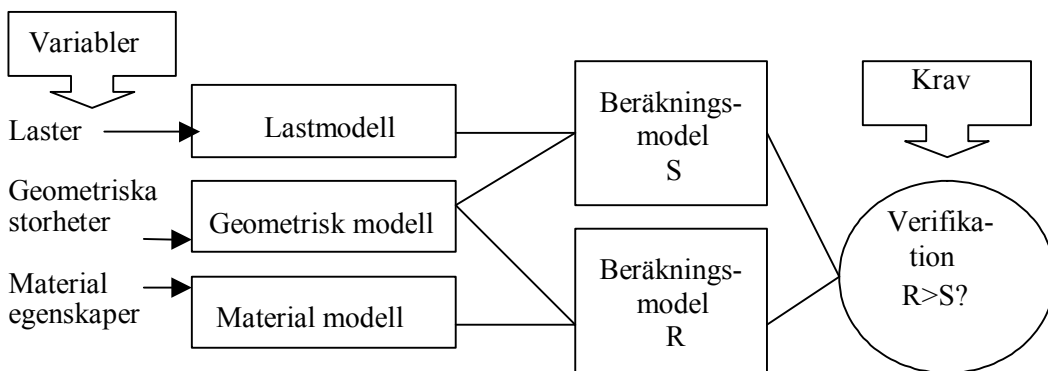
⁴³ Thoft-Christensen, Palle och Baker, Michael J. *Structural Reliability Theory and its Applications*. Kap. 4

Säkerhetsindex antar normalt värden 3.7 till 4.8 vilket motsvarar brottsannolikheter mellan 10^{-4} och 10^{-6} . Brottsannolikheten kan även utläsas ur hjälpfunktionens fördelningsdiagram där p_f är summan av funktionens samtliga värden ≤ 0 , se figur 5.3.



Figur 5.3 Fördelningsfunktion för hjälpfunktion M.

Då en konstruktion planeras ska de angivna dimensioneringarna tillfredställa krav på säkerhetsnivå. För att visa att högsta tillåtna brottsannolikhet inte överskrids verifieras dimensionsberäkningarna under gällande säkerhetsnivå. Dimensioneringsprocessen beskrivs schematiskt i figur 5.4.



Figur 5.4 Schematisk bild av dimensioneringsprocessen.

I dimensioneringsberäkningarna summeras eventuella avvikelser i både variabler och modeller mer eller mindre slumpmässigt, vilket leder till en ackumulerad osäkerhet för den totala beräkningen. I ogynnsamma fall kan därför betydande avvikelser uppträda. Detta måste man ta hänsyn till vid verifikationen. De ingående osäkerheterna

kan beaktas genom att tillämpa sannolikheteoretiska beräkningsmodeller där osäkerheterna bestäms statistiskt. Variablernas osäkerheter kan hanteras genom att anta att variablernas värden varierar i ett intervall istället för att antas vara deterministiska. T ex kan en last antas variera mellan 5 och 10 kN istället för att ansättas till 7.5 kN. Lasten kan även anta olika fördelningar, såsom normalfördelning, lognormalfördelning, likfördelning etc. Lastens intervall och fördelningstyp bestäms genom att analysera statistik av lastens faktiska värde. Denna metod är mycket tidskrävande och används normalt endast då extrema krav ställs på veriferingen, såsom vid dimensionering av kärnkraftverk och flygplan. För ”mindre riskfyllda” konstruktioner såsom bostadshus verifieras dimensioneringen istället oftast med förenklade metoder. Partialkoefficientmetoden började utvecklas på 70-talet för att på ett mer lätthanterligt sätt kunna ta hänsyn till variablernas individuella osäkerheter vid dimensionsverifiering.⁴⁴

5.2 Partialkoefficientmetoden

Partialkoefficientmetoden är en förenklad metod för verifisering av att säkerhetskraven är uppfyllda. Metoden är deterministisk (dvs. den bygger på att de ingående parametrarna *inte* är stokastiska utan antar bestämda värden) och använder sig av flera olika säkerhetsfaktorer, partialkoefficienter, som var för sig beaktar inverkan av olika slag av osäkerheter. Sannolikheteoretiska analyser används för att kalibrera parametervärdena på lastvärden, hållfasthetsvärden och partialkoefficienter.⁴⁵ Metoden, som är förhållandevis enkel att använda, är internationellt accepterad och utgör beräkningsnormen för Boverkets konstruktionsregler, BKR och för EU: s dimensioneringsregler.

5.2.1 Dimensionering med partialkoefficienter

Utgångspunkten för partialkoefficientmetoden är en matematisk beskrivning av gränstillståndet $R-S = 0$. En säkerhetsnivå bestäms för överskridning av gränstillståndet, d.v.s. en acceptabel sannolikhet för att lasteffekten ska överstiga bärförmågan ansätts, kallad brottsannolikhet. Acceptabla värden för brottsannolikheten finns angivna i BKR och ligger mellan 10^{-6} och 10^{-4} för bärande konstruktioner. För den bestämda säkerhetsnivån beräknas de dimensionerade värdena för lasteffekt och bärförmåga med hjälp av s.k. karakteristiska värden och partialkoefficienter.

⁴⁴ Isaksson, Tord, Mårtensson, Annika och Thelandersson, Sven. *Grunderna i Bygghandboken*.

⁴⁵ Carling, Olle. *Nordisk limträhandbok*.

Lasteffekt

$$F_d = \gamma_F \cdot F_k$$

Ekvation 5.3

Dimensionerad lasteffekt

- F_d dimensionerad last
 γ_F lastens partialkoefficient
 F_k lastens karakteristiska värde

Bärförmåga

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

Ekvation 5.4

Dimensionerad bärförmåga⁴⁶

- f_d dimensionerad bärförmåga
 γ_m bärförmågans partialkoefficient
 f_k bärförmågans karakteristiska värde

De karakteristiska värdena definieras för alla ingående parametrar. För att vara på den säkra sidan sätts de karakteristiska värdena högt för laster och lågt för hållfasthetsparametrar. Partialkoefficienterna γ_f och γ_m är normalt större eller lika med 1. De karakteristiska lastvärdena ökas genom multiplikation med γ_f och de karakteristiska hållfasthetsvärdena minskas genom division med γ_m . Alltså minimeras bärförmåga och medan lasteffekten maximeras för att se om villkoret $R \geq S$ fortfarande är uppfyllt.

Partialkoefficienten γ_F tar hänsyn till avvikelser från det karakteristiska värdet och osäkerheten i lastmodellen. Partialkoefficienten γ_m tar hänsyn till avvikelser från karakteristiskt värde, byggnadens karaktär, kontrollen på arbetsplatsen och osäkerheten i beräkningsmodellen.⁴⁷

Konsekvenserna vid ett eventuellt brott, i termer av personskador, beaktas genom införandet av en partialkoefficient för säkerhetsklass. Koefficienten betecknas γ_n och antar värden från 1.0 (för säkerhetsklass 1: liten risk för allvarliga personskador) till 1.2 (för säkerhetsklass 3: stor risk för allvarliga personskador). Säkerhetsklassen är även kopplad till säkerhetsindex, där säkerhetsklass 1 antar $\beta \geq 3.7$, säkerhetsklass 2 antar $\beta \geq 4.3$ och säkerhetsklass 3 antar $\beta \geq 4.8$.⁴⁸ Vidare införs en tredje partialkoefficient, η , som beskriver systematiska skillnader mellan provvärden och uppmätta värden. Den dimensionerade bärförmågan blir

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot \eta}$$

Ekvation 4.5 Dimensionerad bärförmåga⁴⁹

5.2.2 Permanenta och variabla laster

De laster som verkar på en bärande konstruktion delas in i permanenta laster, G , och variabla laster, Q . Den permanenta lasten utgörs främst av konstruktionens egentyngd och varierar relativt lite. Variabla laster består av personer, inredning, snö- och

⁴⁶ Boverket. *Regler för konstruktioner*. Kap. 2

⁴⁷ NKB-skrift nr. 55. *Last och säkerhetsbestämmelser*.

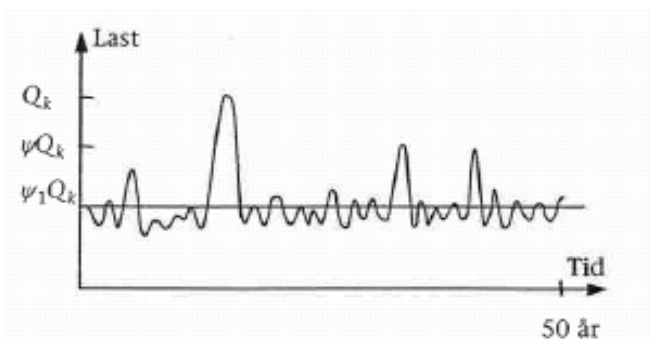
⁴⁸ Boverket. *Regler för konstruktioner*. Kap. 2

⁴⁹ Ibid.

vindlaster. Dessa laster varierar kraftigt både i tid och rum och är därför förknippade med större osäkerheter.

Eftersom den permanenta lasten har en mycket låg variationskoefficient sätts dess karakteristiska värde normalt till egentytningens medelvärde. De variabla lasterna varierar jämförelsevis mycket och deras karakteristiska värden sätts därför betydligt högre än medelvärdet. För variabla laster i brottsgränsen definieras den karakteristiska lasten som 98 % fraktilen för den statistiska fördelningen för lastens årsmaximum, dvs. det lastvärde som i genomsnitt överskrider en gång var 50:e år.⁵⁰

I dimensionsberäkningarna kombineras ofta olika variabla laster. Sannolikheten att extrema värden hos de variabla lasterna ska uppkomma samtidigt är mycket låg. Vid kombination av flera variabla laster reduceras därför alla laster utom huvudlasten med en lastreduktionsfaktor, ψ . Lasten $Q_k\psi$ kallas vanlig last. Den vanliga lasten definieras vanligen som 5-årslasten, dvs. den last som i genomsnitt överskrider en gång var femte år. I figur 5.4 visas förhållande mellan variabla lasters medelvärde, vanlig last och karakteristisk last.



Figur 5.4. Medelvärde ($\psi_1 Q_k$), vanlig last (ψQ_k) och karakteristisk last (Q_k).⁵¹

För att beräkna lasternas dimensionerade värde multipliceras de med partialkoefficienten γ_F . Den totala lasteffekten blir:

$$F_d = G_d + Q_{d1} + \sum_2^m Q_{dm} \cdot \psi_{Qm}$$

Ekvation 5.6. Dimensionerad last med permanent last och flera variabla laster⁵²

Q_1 utgör den variabla huvudlasten, index d står för dimensionerad last.

⁵⁰ Isaksson, Tord, Mårtensson, Annika och Thelandersson, Sven. *Grunderna i Byggkonstruktion*.

⁵¹ Ibid.

⁵² Ibid.

Gränstillståndet kan således uttryckas:

$$R - S = 0 \Leftrightarrow f_d - F_d = 0$$

$$\underbrace{\frac{f_k}{\gamma_m \cdot \gamma_n \cdot \eta}}_{f_d} - \underbrace{G_k \cdot \gamma_{F,G} + Q_{k1} \cdot \gamma_{FQ1} + \sum_2^m Q_{km} \cdot \gamma_{FQm} \cdot \psi_{Qm}}_{F_d} = 0$$

Ekvation 5.7 Gränstillståndet uttryckt i karakteristiska värden, partialkoefficienter och lastreduktioner

5.2.3 Bestämning av partialkoefficienter, karakteristiska värden och lastreduktion

Karakteristiska värden, partialkoefficienter och lastreduktioner finns tabellerade för olika material, laster och kombinationer. Dessa har tagits fram genom analys av omfattande datainsamling i kombination med erfarenhetsmässiga uppskattningar och politiska styrmedel. Sedan partialkoefficientmetoden lanserades för ca 30 år sedan har tabellvärdena ständigt bearbetas för att bli mer tillförlitliga. Nedan följer en kortfattad beskrivning av den del av bestämningen som baseras på analys av statistiskt material.

För att bestämma partialkoefficienter används sannolikhetsteoretiska metoder och bygger på statistiska underlag. För brottsgränstillståndet ska sannolikhetsbegreppet betraktas som ett tankeexperiment: situationer när gränstillståndet överskrids är mycket extrema och sällsynta. Det är ont om data på hållfasthet och laster från kollapsade konstruktioner. Statistiska data vid brottsgränsen bygger istället på extrapoleringar och saknar egentligt erfarenhetsmässigt underlag. Koefficienterna bestäms därför genom analys av statistiska data i kombination med erfarenheter från tillämpning av tidigare normer.⁵³

Matematiskt kan bestämningen av partialkoefficienter beskrivas som en jämförelse mellan beräkningsresultaten från sannolikhetsteoretisk metod och partialkoefficientmetoden. I den sannolikhetsteoretiska uträkningen fås brotts sannolikheten. I partialkoefficientmetoden ansätts en brotts sannolikhet. Om de antagna partialkoefficienterna är riktiga bör alltså partialkoefficientmetodens ansatta brotts sannolikhet överensstämma med resultatet från den sannolikhetsteoretiska uträkningen. Om dessa inte överensstämmer justeras partialkoefficienter och ansatt brotts sannolikhet.

De karakteristiska värdena bestäms genom statistiska analyser av parametrarnas årsmedelvärde. För variabla laster definieras det karakteristiska värdet Q_k som 98 % fraktilen för den statistiska fördelningen för lastens årsmedelvärde, och kallas även 50-års lasten. För bärförmågan bestäms det karakteristiska värdet som den lägre fraktilen, dvs. det lägsta värdet på bärförmågan under en bestämd period. Då den fasta

⁵³ NKB: Last och säkerhetsbestämmelser. Appendix B och K

lasten varierar mycket lite från år till år, sätts det karakteristiska värdet G_k till lastens medelvärde. Lastreduktionen bestäms också genom analys av årsmedelvärdet.

5.3 Känslighetsanalys

För att undersöka hur en viss variabel påverkar osäkerheter i bärförmåga och påfrestning kan en känslighetsanalys göras. Analysen ska ta hänsyn till både hur stor variabeln är och hur mycket den varierar, dvs. medelvärdet och variansen. Exempelvis kan en liten variabel last påverka spridningen i lasteffekten mer än en större permanent last, eftersom den permanenta lastens variation är mycket liten. Påverkan beskrivs med en känslighetsfaktor, α , som uttrycker storlek och betydelse av osäkerheten hos variabeln. α -värdena kan beskrivas som ett normerat värde på produkten av variabelns standardavvikelse och partiell derivata. Känslighetsfaktorn antar värden mellan -1 och 1.⁵⁴

Om variablerna är normalfördelade beräknas α :

$$\alpha_i = \frac{\kappa_i}{\sqrt{\sum \kappa^2}} \quad \text{där } \kappa \text{ är ett hjälpvärde:} \quad \kappa_i = \sigma_i \cdot \left. \frac{\partial Q}{\partial X_i} \right|_{X=\mu}$$

$$\sum \alpha^2 = 1$$

Ekvation 5.8 Känslighetsfaktor⁵⁵

Hjälpvärdet för en variabel fås alltså genom att multiplicera variabelns standardavvikelse med den partiella derivatan i medelvärdespunkten. Ju större värde känslighetsfaktorn antar, desto mer påverkar variabeln brottsekvationens osäkerhet. För påfrestningarna på en konstruktion kan känslighetsanalys göras av variablerna egentynngd, människolast, möbellast, snölast osv.

Observera att känslighetsanalysen beskriver variabelns betydelse för osäkerheten i bärförmåga/påfrestning och *inte* variabelns betydelse för bärförmågans/påfrestningens storlek.

⁵⁴ NKB: *Last och säkerhetsbestämmelser*. Appendix B

⁵⁵ Ibid.

6 Applikation av partialkoefficientmetoden på energiberäkningar

I kapitlet görs en ansats att applicera konstruktionsteknikens tillförlitlighetsanalys på energiberäkningar för bostadshus. Först görs en överskådlig analogi mellan dimensioneringsberäkningar och energiberäkningar för att sedan beskriva en mer detaljerad applikation av partialkoefficientmetoden.

6.1 Analogier mellan byggkonstruktionens dimensioneringsberäkningar och byggfysikens energiberäkningar

I konstruktionstekniken beaktas bärförmåga och påfrestningar vid dimensionering av konstruktioner (se kapitel 5). En konstruktions bärförmåga och påfrestningar beror av en mängd faktorer, nedan ges en sammanfattning av dessa.

Bärförmåga

Materialegenskaper
Geometrisk storheter
Noggrannhet vid utförande

Påfrestningar

Permanenta laster
Variabla laster
Snö- och vindlaster
Geometrisk storheter

I energiberäkningar för byggnader kan en liknande uppställning göras: Den energi som tillförs byggnaden och den värme som ”stannar kvar” pga. isolering kan sägas ”bära upp” krav och önskemål om byggnadens funktioner och inneklimat. Tillförd energi och värmemotstånd i klimatskalet kan således liknas vid konstruktioners bärförmåga. Energi lämnar byggnaden genom väggar, med varm ventilationsluft och varmt avloppsvatten (se kap 3). Förlusterna betyder att energi måste tillsättas för att upprätthålla inneklimatet och dessa frestar således på energianvändningen. Energiförlusterna kan därför liknas vid påfrestningar i form av laster av olika slag. För att jämföra dimensionsberäkningar med energiberäkningar görs en uppdelning av energiberäkningsvariabler i bärförmåga och påfrestningar:

Bärförmåga

Klimatskalets värmemotstånd
Soltillskott
Personvärme
Värmeåtervinning
Spillvärme

Påfrestningar

Temperaturdifferens
Luftväxling
Varmvattenanvändning
El till apparater och belysning

Ju större skillnaden är mellan inne- och utetemperatur, ju högre ventilationsgraden är, ju mer varmvatten och el som används desto större blir ”påfrestningarna”, vilket måste bäras upp med en större ”bärförmåga” för byggnaden.

Analogin ovan ges som ett tankeexempel för att förtydliga likheter mellan dimensionering med tillförlitlighetsanalys och energiberäkningar för bostäder. Uppdelningen saknar praktisk relevans eftersom "bärförmågan", i ett längre tidsperspektiv, alltid är lika stor som "påfrestningarna" i en byggnad. För att upprätthålla önskat inneklimat måste energiförlusterna balanseras med energitillförseln. Om t ex förlusterna är lägre än tillförseln så kommer innetemperaturen att öka. Eftersom studien utgår från det årliga energibehovet antas statistiskt inneklimat och den tillförda energi är därför alltid lika stor som energiförlusterna. Det är med denna uppdelning alltså inte relevant att se huruvida "påfrestningarna" överskrider "bärförmågan" för byggnaden.

Vid dimensionering med tillförlitlighetsanalys används uppdelningen i påfrestningar och bärförmåga för att kunna beräkna sannolikheten för att påfrestningarna överskrider bärförmågan. Sannolikheten kallas brottsannolikhet.

För att kunna ansätta en "brottsannolikhet" i analogi med dimensioneringsberäkningarna sökes en alternativ uppdelning för energianvändningen. Om det finns restriktioner för hur mycket energi en byggnad får lov att använda kan denna energimängd antas vara byggnadens maximalt tillåtna energibehov. Det maximalt tillåtna energibehovet kan liknas vid "bärförmågan". Byggnadens faktiska energianvändning liknas vid "påfrestningarna". Om byggnadens faktiska energianvändning överskrider maximalt tillåtet energibehov följs inte reglerna. Detta kan leda till sanktioner av olika slag. I studien är det därför mer relevant att jämföra faktisk energianvändning mot maximalt tillåten energianvändning. Den maximalt tillåtna energianvändningen sätts här till Boverkets föreslagna regler för energianvändning, Q_{BBR} . Energianvändningen ställs upp enligt Boverkets definition, där behovet av köpt energi är summan av transmissions-, ventilations- och läckageförluster, värme till varmvatten, drift och reglerförluster, fastighetsel med avdrag för värmeåtervinning och tillskottsvärme. Den alternativa uppdelningen blir:

Bärförmåga

Q_{BBR}
Tillskottsvärme
Återvinning

Påfrestningar

Transmissionsförluster
Ventilationsförluster
Läckageförluster
Varmvatten
Drift- och reglerförluster
Fastighetsel

I analogi med konstruktionstekniken kan grundvillkor för energiberäkningen sättas upp:

$$\underbrace{Q_{BBR}}_{\text{Bärförmåga}} - \underbrace{Q_{\text{energi}}}_{\text{Påfrestningar}} \geq 0$$

där $Q_{\text{energi}} = Q_{\text{trans}} + Q_{\text{vent}} + Q_{\text{läck}} + Q_{\text{tvv}} + Q_{\text{dr}} + Q_{\text{fhet}} - Q_{\text{tillskott}} - Q_{\text{åter}} \rightarrow$

$$\underbrace{Q_{\text{BBR}}}_{\text{Bärförmåga}} - \underbrace{(Q_{\text{trans}} + Q_{\text{vent}} + Q_{\text{läck}} + Q_{\text{tvv}} + Q_{\text{dr}} + Q_{\text{el}} - Q_{\text{tillskott}} - Q_{\text{åter}})}_{\text{Påfrestningar}} \geq 0$$

Ekvation 6.1 Bärförmåga och påfrestningar för grundvillkoret

Brottsgränsen är, i analogi med konstruktionstekniken, då påfrestningarna är lika stora som bärförmågan.

$$\underbrace{Q_{\text{BBR}}}_{\text{Bärförmåga}} - \underbrace{Q_{\text{energi}}}_{\text{Påfrestningar}} = 0$$

Ekvation 6.2 Bärförmåga och påfrestning vid brottsgränsen

Om brottsgränsen överskrids, dvs. om energianvändningen blir högre än Boverkets remissförslag, blir konsekvenserna givetvis inte lika allvarliga som inom konstruktionstekniken. Här finns ingen egentlig ”brottsgräns” eftersom en kollaps inte inträffar om gränsen överskrids. En överskridning av gränsen kommer istället att leda till eventuella sanktioner från tillsynsmyndigheten.

Dimensionering med tillförlitlighetsanalys bygger på att en sannolikhet för att gränstillståndet överskrids ansätts. Analogt med konstruktionstekniken kan en högsta ”tillåten” sannolikhet för att gränstillståndet överskrids väljas även för energianvändningen. Val av ”brotts sannolikhet” kan tänkas bero på sanktionernas utformning och andra incitament till att följa reglerna. Rimliga värden på brotts sannolikheten torde ligga runt 0.1, dvs. att en byggnad av tio lever inte upp till samhällets krav på energiprestanda.

6.2 Applicering av partialkoefficientmetoden

En applikation av partialkoefficientmetoden på energiberäkningen skulle möjliggöra kontroll av att energianvändningen inte överskrider maximalt tillåten energianvändning för en bestämd säkerhetsnivå. Här ges teoretisk bakgrund till en sådan applikation. (Se kap. 5.2 för beskrivning av partialkoefficientmetoden.)

I analogin ovan görs uppdelningen i ”bärförmåga” och ”påfrestningar”:

- Bärförmågan sätts till maximal tillåten energianvändning enligt Boverkets föreslagna regler.
- Påfrestningarna är summan av transmissions-, ventilations-, läckage-, drift- och reglerförbrukningar samt värme till varmvatten och fastighetsel med avdrag för tillskottsvärme och värmeåtervinning.

Delposternas ”dimensionerade värden” bestäms på samma sätt som konstruktioners dimensionerade värden, m h a partialkoefficienter och karakteristiska värden. Partialkoefficienterna bör ta hänsyn till avvikelser från det karakteristiska värdet och

osäkerheten i beräkningsmodellen. De karakteristiska värdena för delposterna bör baseras på statistiska analyser av posternas årsmedelvärden.

Det maximalt tillåtna energibehovet är deterministiskt och dess karakteristiska värde sätts således till det faktiska värdet, Q_{BBR} . Detta betyder att bärformågan är fix ($110/130 \text{ kWh/m}^2$) och dess karakteristiska värde sätts till medelvärdet. Påfrestningarnas alla delposter antas variera. Vitsen med partialkoefficientmetoden är att se om bärformågan är större eller lika stor som påfrestningarna även under ogynnsamma förhållanden. För att kontrollera detta maximeras de delposter som påverkar summan av påfrestningen positivt (transmissions-, ventilations-, läckage-, drift- och reglerförluster samt värme till varmvatten och fastighetsel). Detta görs genom att multiplicera delposterna med en partialkoefficient som är större eller lika med 1 och att ansätta ett karakteristiskt värde som utgörs av maximala värdet under en bestämd tidsperiod. Tillskottsvärmen och värmeåtervinningen gör att påfrestningarna blir mindre. Dessa poster minimeras istället genom att dividera dem med partialkoefficienter större eller lika med 1, samt att ansätta det karakteristiska värdet som minimivärdet under den bestämda tidsperioden. Uppdelningen görs alltså för att se om villkoret 'bärformåga - påfrestning ≥ 0 ' uppfylls även under ofördelaktiga förhållanden.

Resultatet blir ekvationer för dimensionerade värden. Med dimensionerade värden menas de ansatta värden som behövs för att säkerställa att brottsgränsen inte överskrids.

Bärformågan

$$f_d = Q_{BBR}$$

Ekvation 6.3 Dimensionerad bärformåga

Påfrestning

$$F_d = \gamma_{trans} \cdot Q_{k,trans} + \gamma_{vent} \cdot Q_{k,vent} + \gamma_{läck} \cdot Q_{k,läck} + \gamma_{tvv} \cdot Q_{k,tvv} + \gamma_{dr} \cdot Q_{k,dr} + \lambda_{fhel} \cdot Q_{k,fhel} - \frac{Q_{k,åter}}{\gamma_{åter}} - \frac{Q_{k,tillskott}}{\gamma_{tillskott}}$$

Ekvation 6.4 Dimensionerad påfrestning

I analogi med konstruktionstekniken betecknar γ partialkoefficient och indexet k karakteristiskt värde.

Sannolikheten att flera av påfrestningens delposter antar extremt höga värden samtidigt är mycket låg. I partialkoefficientmetoden för dimensioneringar hanteras detta genom att införa en lastreduktionsfaktor ψ för alla laster utom huvudlasten. Analogt går det att sätta en av påfrestningens delposter till huvudlast och reducera

övriga poster med en lastreduktion. Om transmissionsförlusterna antas vara "huvudlasten" blir den dimensionerade påfrestningen:

$$F_d = \gamma_{trans} \cdot Q_{k,trans} + \gamma_{vent} \cdot Q_{k,vent} \cdot \psi_{vent} + \gamma_{läck} \cdot Q_{k,läck} \cdot \psi_{läck} + \gamma_{tvv} \cdot Q_{k,tvv} \cdot \psi_{tvv} + \gamma_{dr} \cdot Q_{k,dr} \cdot \psi_{dr} + \lambda_{fhel} \cdot Q_{k,fhel} \cdot \psi_{fhel} - \frac{Q_{k,åter} \cdot \psi_{åter}}{\gamma_{åter}} - \frac{Q_{k,tillskott} \cdot \psi_{tillskott}}{\gamma_{tillskott}}$$

Ekvation 6.5 Dimensionerad påfrestning med lastreduktion, med transmission som huvudlast

Liksom då partialkoefficientmetoden används vid dimensionsberäkningar måste karakteristiska värden, lastreduktionsfaktorer och partialkoefficienter väljas för en bestämd brotts sannolikhet. Om det accepteras att en av tio byggnader inte lever upp till kraven på energiprestanda ser koefficienterna annorlunda ut än om acceptansen är en byggnad på hundra.

Det stora arbetet för att kunna applicera metoden består givetvis i att ta fram relevanta partialkoefficienter och karakteristiska värden för energiberäkningens delposter. Arbetet måste baseras på stora datainsamlingar av delposternas faktiska värden, som i kombination med vald säkerhetsnivå kan användas för att välja karakteristiska värden och partialkoefficienter. Liksom inom konstruktionstekniken är det troligt att valet av partialkoefficienter och karakteristiska värden delvis skulle baseras på politiska beslut och erfarenhetsmässiga bedömningar. Det är inte möjligt att inom studiens ramar utveckla generella förslag till partialkoefficienter och karakteristiska värden. Simulering av energianvändningens varians i ett typhus kommer istället att indikera storleksordningen för partialkoefficienter och karakteristiska värden för typhuset.

7 Simulering: bakgrund och indata

Här förklaras de olika simuleringarna som utförs i studien samt de antaganden och förenklingar som görs. Val av indata för de olika variablerna och konstanterna motiveras.

Det är svårt att generellt beskriva hur mycket energianvändningen i bostäder kan variera. Variationen beror på en mängd faktorer såsom bostadens utformning, de vitvaror som finns, om det är bostadsrätter eller hyresrätter osv. Här görs simuleringar för ett specifikt hus som kallas typhuset. Parametrar som areor, värmesystem, typ av återvinning, vattenarmatur, isoleringsgrad och ägandekategori är desamma som för typhuset.

Simuleringarna för både bärförmåga och påfrestningar görs med Monte Carlo metoden (se kap 4.2). Detta innebär att de delposter som är osäkra tillåts variera i ett intervall istället för att vara deterministiska. Bärförmågan är maximalt tillåten energianvändning och påfrestningarna är husets beräknade energibehov. Bärförmågan är i detta fall deterministisk, medan påfrestningarnas delposter varierar. Detta betyder att den beräknade totala påfrestningen kommer variera och återfinnas i ett intervall. I simuleringarna beräknas även sannolikheten att påfrestningarna överstiger bärförmågan (brottsannolikhet). Detta betyder att en brottsannolikhet inte ansätts utan istället räknas fram. Simuleringen är således en tillförlitlighetsanalys för att se hur troligt det är att energianvändningen i typhuset överskrider Boverkets föreslagna krav på maximalt tillåtet energibehov.

För att analysera vilka osäkerheter som är beroende av byggnadens prestanda och vilka som kan kopplas till brukaren, studeras tre olika fall:

1. Energianvändning vid referensdrift
2. Energianvändning vid aktuell drift
3. Energianvändningens varians som enbart beror av brukaren, här kallad brukardrift.

Referensdrift är den drift som behövs för en ”normalbrukare”. Den aktuella driften avser varianser både i husets prestanda och i brukarbeteende. Den tredje simuleringen avser osäkerheter i energiberäkningen som enbart kan kopplas till brukaren. (Se kapitel 3.3 för diskussion om brukarberoende och prestandaberoende parametrar.)

För referensdriften antas brukaren vara en normalbrukare och alla parametrar som påverkas av brukaren sätts till genomsnittliga värden. Alla brukarberoende parametrar antas alltså inte variera. Variansen i energianvändningen för referensdrift beror enbart på varianser i husets prestanda, såsom osäkerheter gällande förekomsten av köldbryggor och verkningsgrad på värmeåtervinning. För aktuell drift varierar även de parametrar som är brukarberoende, såsom innetemperatur, varmvattenförbrukning och vädring. För brukardrift antas enbart de delposter som kan knytas till brukaren variera.

Energiberäkningens delposter delas upp i konstanter och variabler. Uppdelningen beror på vilken drift som avses. För alla tre fall simuleras bärförmåga och påfrestning enligt definition i kap 6 (se ekvation 6.1).

$$\text{Bärförmåga} = Q_{BBR}$$

$$\text{Påfrestning} = Q_{trans} + Q_{vent} + Q_{läck} + Q_{tvv} + Q_{dr} + Q_{el} - Q_{tillskott} - Q_{åter}$$

7.1 Definition av simuleringsekvationer

Hur de olika delposterna behandlas i studien beror främst på tillgänglig data och delpostens karaktär; t ex beskrivs transmissionsförlusterna som en funktion där värmegenomgångskoefficienten och innetemperaturen kan variera, medan energi till tappvarmvattnet behandlas som en variabel. De parametrar som används beskrivs i ekvation 7.1 och 7.2 nedan (se kapital 3.2 för förklaringar).

$$\text{Bärförmåga} = Q_{BBR}$$

$$\begin{aligned} \text{Påfrestningar} = & \underbrace{U_m \cdot \frac{A_{skal}}{A_{BRA}} \cdot (T_i - T_u) \cdot t}_{Q_{trans}} + \underbrace{(q_v + q_l) \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T_i - T_u) \cdot t}_{Q_{vent} + Q_{läck}} + Q_{tvv} + \\ & \underbrace{p_{dr} \cdot (U_m \cdot \frac{A_{skal}}{A_{BRA}} \cdot (T_i - T_u) \cdot t + Q_{tvv})}_{Q_{dr}} + Q_{fshel} - \underbrace{Q_{sol} - p_{hhel} \cdot Q_{hhel} - p_{tvv} \cdot Q_{tvv} - Q_{pers}}_{Q_{tillskott}} - \\ & \underbrace{(v-1) \cdot Q_{pump}}_{Q_{åter}} \end{aligned}$$

Ekvation 7.2 Utveckling av ekvation för påfrestningar

U_m	Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient
A_{skal}	Klimatskalets area
A_{BRA}	Bruksarea
T_i	Innetemperatur
T_u	Utetemperatur
t	Tid
q_v	Ventilationsflöde
q_l	Läckageflöde
c_p	Värmekapacitet för luft
ρ	Densitet för luft
Q_{tvv}	Energi till tappvarmvatten
p_{dr}	Del av energi från uppvärmningssystemet och tappvarmvatten som inte kommer byggnaden tillgodo, dvs. förlustdel.

Q_{fhel}	Fastighetsel
Q_{sol}	Energitillskott pga. solstrålning
p_{hhel}	Del av hushållselen som tillgodogörs i form av värmertilskott
Q_{hhel}	Hushållsel
Q_{pers}	Personvärme
p_{tvv}	Del av energin till tappvarmvattnet som tillgodogörs i form av värmertilskott
v	Värmepumpens värmefaktor
Q_{pump}	Energi till värmepump

7.2 Variabler och konstanter

I simuleringarna delas parametrarna upp i variabler och konstanter.

Uppdelningen beror på om det är referensdriften eller den aktuella driften som avses.

Följande parametrar antas variera:

1. **Referensdrift:** Värmegenomgångstalet, ventilations- och läckageflöde (utan vädringstillskott), drift och reglerförluster, fastighetsel, soltillskott, spillvärme-del från hushållsel och tappvarmvatten samt värmepumpens värmefaktor.
2. **Aktuell drift:** Samtliga parametrar i referensdriften samt de brukarberoende parametrarna: innetemperatur, vädringstillskott, värme till tappvarmvatten, hushållsel och personvärme.
3. **Brukardrift:** Endast innetemperatur, vädringstillskott, värme till tappvarmvatten, hushållsel och personvärme varieras. Alla parametrar som beskriver husets prestanda hålls konstanta.

I studien används Skanskas ”Moderna Hus” som referenshus, här kallat typhuset.

Detta betyder att ventilationsflöde, återvinning, varmvatten etc. är uppskattade för ett flerbostadshus med typhusets standard. Dimensioner och typ av återvinningssystem är också hämtade från typhuset. Typhuset är ett åttavånings flerbostadshus med fyra lägenheter på vardera plan. Lägenheterna är hyresrätter med balkonger. Radiatorerna värms dels med fjärrvärme, dels med värme från återvinningssystemet.

Återvinningssystemet utgörs av en värmepump som tar tillvara på värmen från frånluften. Ventilationen styrs av ett frånluftssystem med fläkt i badrum och kök.⁵⁶

För att kunna uppskatta hur mycket de olika delposterna varierar har data studerats. Energianvändning i hus varierar beroende på typ av hus (flerbostadshus/småhus), byggnadsår, ägandeform (hyresrätt/bostadsrätt), boendeprofil etc.⁵⁷ I studien är därför främst data för hyresrätter i nybyggda flerbostadshus intressanta. Få mätningar har gjorts på hur stora de olika delposterna i energibalansen faktiskt är, i synnerhet på nybyggda flerbostadshus. Ofta finns endast total energianvändning uppmätt eller uppskattad. I många mätningar är det också svårt att avgöra vilken area som anges

⁵⁶ Skanska Teknik. *Projektbeskrivning ”Moderna Hus”*.

⁵⁷ REPAB. *Årskostnader för bostäder*.

och huruvida garage ingår i bruksarean. Eftersom samtliga energiposter anges i energianvändning per areaenhet är det av yttersta vikt att definiera vilken area som avses.

Pga. begränsad tillgång på relevant data har variablernas fördelningar uppskattats genom:

- Analys av datainsamling från ett antal nya bostäder i Stockholm.
- Genomgång av tidigare mätningar.
- Erfarenhetsmässiga uppskattningar.
- Antagande att samtliga variabler är normalfördelade.

Data finns från ett 1000-tal nybyggda lägenheter i flerbostadshus i Stockholm i husen har fastighetsel, varmvatten, hushållsel, innetemperatur och värmeförbrukning har mätts i varje lägenhet. Husen är bostadsrätter, med snålspolande armatur vilket gör att värdena korrigeras för typhusets prestanda med hyresrätter och normalspolande armatur. Även äldre data har studerats och har använts som referensmaterial. Framförallt har värden från REPAB *Årskostnader för bostäder* och Bygghälsningsrådets ELIB-rapport *Bostadsbeståndets inneklimat* används. REPAB redovisar en kostnadsammansättning av årskostnader och energianvändning för bostäder, vars underlag erhålls från förvaltare och ägare av bostadsfastigheter. ELIB-rapporten sammanställer inneklimat och innetemperatur från en stor undersökning av inneklimatet i flera tusen svenska hem i början av 90-talet.

Delposternas varianser har, med resultat från dataanalysen som bakgrund, uppskattats genom erfarenhetsmässiga bedömningar. Personer med mångårig erfarenhet från bostäders energianvändning och energiberäkningar har uppskattat rimligheten i resultaten från dataanalysen och även kalibrerat värdena för typhusets standard. Uppskattningarna har framförallt gjorts av Catarina Warfvinge, Lars Jensen och Birgitta Nordquist vid Lunds Tekniska Högskola och Anders Almgren på Skanska Teknik.

Antagandet att samtliga variabler är normalfördelade görs dels för att den är matematiskt lätthanterlig och dels pga. normalfördelningens generella karaktär. Analys av data både från bostäderna i Stockholm och från ELIB-rapporten tyder även på att normalfördelningen är en rimlig approximation för de flesta variabelers variabilitet. Fördelningarnas medelvärde och standardavvikelse har uppskattats på två olika sätt. För de variabler där det funnits en datamängd har datamaterialet analyserats i Matlab, där en ”normalanpassning” har utförts för att resultera i medelvärde och standardavvikelse. Denna metod har använts för fastighetsel, värme till varmvatten, hushållsel och innetemperatur. Övriga variabler har uppskattats i ett intervall, där medelvärdet har satts till ”mittvärdet” och där sambandet att 6 standardavvikelser utgör 99.7 % av fördelningen har utnyttjats för att ta fram standardavvikelsen.

Samtliga variabler antas vara oberoende av varandra och kovariansen sätts därmed till noll. Detta är en förenkling eftersom många variabler påverkar varandra, det är t ex rimligt att anta att en minskning i ventilationsflödet ökar vädringsfrekvensen.

Förenklingen görs eftersom energianvändning i byggnader är ett komplext system och det är omöjligt att inom studiens ramar bestämma samvariationerna mellan de olika variablerna.

Simuleringarnas stora svaghet är bristen på relevant data. För att få mer tillförlitliga resultat behövs mer mätningar av delposternas faktiska värden. Simuleringsresultaten ska därför ses mer som en indikation på hur energianvändningen kan variera i ett flerbostadshus. Syftet med simuleringarna är framförallt att visa *hur* osäkerheter i delposterna kan hanteras individuellt för att beräkna varians i den totala energiberäkningen och hur tillförlitlighetsanalys kan utföras på energiberäkningen.

Konstanter och variabler har dock valts så verklighetstroligt som möjligt. Nedan följer en motivering till hur delposternas värden har uppskattats. Här är både brukarberoende och byggtekniska varianser medtagna. I slutet av avsnittet delas sedan fördelningarna upp för referens-, aktuell- och brukardrift. För referensdriften sätts alla brukarberoende parametrar till genomsnittlig förbrukning, för brukardrift sätts alla byggnadstekniska parametrar till genomsnittliga värden.

7.2.1 Transmissionsförluster

$$Q_{trans} = U_m \cdot A \cdot (T_i - T_u) \cdot t_{korr}$$

U_m är den genomsnittliga värmeegenomgångskoefficienten för hela klimatskalet, dvs. inklusive köldbryggor, tak, golv, dörrar och fönster. U_m varierar dels med isolerskiktens inbördes varians, dels med hur klimatskalet har konstruerats (hur väl köldbryggor har undvikits, om isolerskiktens avstånd är de ansatta). Data saknas för hur U_m kan variera. I studien baseras U_m på beräkningar i ISOVER⁵⁸ för typhuset, för att sedan antas variera +20%. Transmissionsförlusterna avser bruttotransmissionen, därför görs inga korrigeringar för soltillskott i söder (detta tillskott tillkommer under soltillskottet). Köldbryggor i ISOVER beaktas genom att tilldela en viss del av klimatskalets area ett högre U-värde. ISOVERs U_m sätts som minivärde, vilket motiveras med erfarenhetsmässiga observationer där faktiska U-värden brukar vara lika stora eller större än beräknade U-värden.⁵⁹ ISOVER ger värde på U_m 0.440 W/m², K.⁶⁰ U_m antas alltså kunna variera mellan 0.440 och 0.528 W/m²,K. Antagande om normalfördelning ger:

$$U_m \in N(0.48, 0.015) \quad [\text{W/m}^2, \text{K}]$$

A_{om}/A_{BRA} är förhållandet mellan arean av klimatskalet och bruksarean. Här antas att dimensionerna i huset kommer att överensstämja med ritningarna, och areorna betraktas som deterministiska. I typhuset är förhållandet $2185/2476 = 0.882$.⁶¹

⁵⁸ ISOVER används för att bestämma U-värden för olika byggkonstruktioner och beräkna effekten av köldbryggor.

⁵⁹ Dyrstad Pettersen, Trine. *Uncertainty analysis of energy consumption in dwellings*. Kap. 3

⁶⁰ Skanska Teknik. *Projektbeskrivning "Moderna Hus"*.

⁶¹ Ibid.

Innetemperaturen T_i bestäms genom att normalfördela uppmätta innetemperaturer från 4 nya objekt i Stockholm.⁶² Innetemperaturerna normalfördelas, vilket ger

$$T_i \in N(22.2, 1.14) \quad [^\circ\text{C}]$$

Uppskattningen av T_i stämmer väl överens med tidigare uppmätta värden.⁶³

Energibalansen beräknas på årsbasis med normalårskorrigerings. Detta innebär att justeringar görs från avvikelser från i utetemperaturen från normalår. T_u antas därför vara deterministiskt. För Örebroregionen är normalårsvärdet 5°C .⁶⁴

U_m anges i enheten W medan transmissionsförlusterna anges i $\text{kWh}/\text{m}^2, \text{år}$. Tiden som avses är ett år. Parametern t_{korr} omvandlar transmissionsförlusterna till den önskade enheten $\text{kWh}/\text{m}^2, \text{år}$.

$$t_{\text{korr}} = 8.76 \quad ^{65}$$

7.2.2 Ventilations- och läckageförluster

$$Q_{\text{vent}} = q_{\text{vent}} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_u) \cdot t_{\text{korr}}$$

q_{vent} är ventilationsflödet. Typhuset har frånluftsventilation och ventilationen regleras genom utsug i badrum och kök, där flödet kan forceras i köket. I typhuset finns i alla lägenheter ett badrum och ett kök. I badrum är luftutsuget 10 l/s , och i kök 15 l/s , vilket ger ett genomsnittligt flöde på $0,465 \text{ h}^{-1}$ eller 0.32 l/s, m^2 . Maxvärde för forcering av fläkt i kök sätts till 2 h per dag och lägenhet (då det inte är sannolikt att fläktarna forceras på maxflöde mer än 2 h/dag och lägenhet). Detta ger ett flöde på 0.51 h^{-1} eller 0.35 l/s . Ventilationsflödet antas alltså variera mellan 0.32 och 0.35 l/s, m^2 . Antagen normalfördelning ger

$$q_{\text{vent}} \in N(0.335, 0.005) \quad [\text{l/s, m}^2]$$

$$\rho = 1.205 \quad [\text{g/l}]$$

$$c_p = 1.006 \quad [\text{J/g}_{\text{luft}}, \text{K}]$$

Läckageförlusterna beräknas analogt med ventilationsförlusterna.

$$Q_{\text{läck}} = q_{\text{läck}} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_i - T_u) \cdot t_{\text{korr}}$$

Läckageflödet beror på hur tätt klimatskalet är. Skanskas schablonvärde är $3 \text{ m}^3/\text{m}^2, \text{h}$ (eller 0.8 l/s, m^2) vid tryckskillnad 50 kPa . Normal tryckskillnad är ca $5\text{-}10 \text{ kPa}$, beroende på fläktsystem. Typhuset har frånluftssystem som är mindre känsligt för

⁶² Hagengran, Per och Stenberg, Karl. *Orsaker till differenser mellan beräknad och faktisk energianvändning i nyproducerade flerbostadshus*.

⁶³ ELIB. *Bostadsbeståndets inneklimat*.

⁶⁴ SMHI. *Klimatdata*. Internet.

⁶⁵ 1 W motsvarar 8.76 kWh/år .

läckage än hus med självdrag eller från- och tilluftssystem pga. tryckskillnaden. Läckageflödet antas därför kunna variera mellan 0.05 och 0,1 h⁻¹ eller 0.035 l/s,m² och 0.070 l/s,m² vid normal tryckskillnad.⁶⁶

Till denna post läggs vädringen, som är svår att uppskatta. Enkätundersökningar i Stockholm tyder på ett vädringsbeteende som motsvarar 5 l/s och lgh i genomsnitt⁶⁷, vilket ger ett påslag på 0.09 h⁻¹ eller 0.065 l/s,m². Eftersom vädringstillskottet är såpass osäkert antas posten kunna variera +/- 50 % för den aktuella driften, dvs mellan 0.032 och 0.097 l/s,m².

För referensdrift antas inte vädringstillskottet variera eftersom posten är brukarberoende. För referensdriften antas därför vädringstillskottet vara medelvärdet; 0.09 h⁻¹. För brukardriften är det bara vädringen som varierar, medan övrigt läckageflöde sätts till genomsnittet 0.052 l/s,m² och den totala vädringen varierar mellan 0.084 l/s,m² och 0.149 l/s,m². Normalfördelning ger:

För referensdrift:

$$q_{\text{läck}} \in N(0.12, 0.0058) \quad [\text{l/s,m}^2]$$

För aktuell drift:

$$q_{\text{läck}} \in N(0.12, 0.017) \quad [\text{l/s,m}^2]$$

För brukardrift:

$$q_{\text{läck}} \in N(0.12, 0.011) \quad [\text{l/s,m}^2]$$

Det finns en korrelation mellan vädring och övrigt läckageflöde: då fönstret öppnas minskar tryckskillnaden över klimatskalet och läckageflödet minskar således. Eftersom korrelationsgraden är svår att avgöra och eftersom läckageflödena är små relativt ventilationsflödet bortses betydelsen av den i studien.

7.2.3 Energi till tappvarmvatten

Energianvändningen för tappvarmvattnet från mätningar från bostäderna i Stockholm visar en varians mellan 18 och 30 kWh/m².⁶⁸ Eftersom det statistiska underlaget består av bostadsrätter med snålspolande armatur antas typhusets varmvattenanvändning vara högre, men variansen densamma. Energianvändningen antas variera mellan 24 och 36 kWh/m²,⁶⁹ vilket överrensstämmer med värden från REPAB⁷⁰. Antagen normalfördelning ger

$$Q_{\text{tv}} \in N(30, 2) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

⁶⁶ Warfvinge, Catarina. Personlig kommunikation.

⁶⁷ Nordquist, Birgitta. Personlig kommunikation.

⁶⁸ JM-data.

⁶⁹ Warfvinge, Catarina. Personlig kommunikation.

⁷⁰ REPAB. *Bostäder. Nyckeltal för kostnader och förbrukningar.*

7.2.4 Drifts- och reglerförluster

Drift och reglerförlusterna beräknas som en procentsats av den energi som går till uppvärmnings- och varmvattensystemet.

$$Q_{dr} = p_{dr} \cdot (Q_{värme} + Q_{tvv})$$

$Q_{värme}$ är den energi som används till husets värmesystem, och utgörs av en del av transmissionsförlusterna. Värme från värmesystemet täcker inte upp hela transmissionsförlusterna, eftersom förlusterna även täcks av värme från återvinningssystem, soltillskott etc. En rimlig uppskattning är att värmesystemet står för ca 60 % av uppvärmningen.⁷¹

$$Q_{dr} = p_{dr} \cdot (0.6 \cdot Q_{trans} + Q_{tvv})$$

Hur stora drift- och reglerförlusterna är beror på hur huset är byggt: hur rören är lagda, radiatorernas prestanda osv. Då det är svårt att avgöra hur stora dessa förluster är antas p_{dr} vara densamma för både uppvärmnings- och varmvattensystemet. Här uppskattas förlusterna variera mellan 5 och 10 %.⁷² Antagande om normalfördelning ger:

$$p_{dr} \in N(0.075, 0.0125)$$

7.2.5 Fastighetsel

Dataunderlag från Stockholmsbostäderna visar på en förbrukning av fastighetsel mellan 12 och 16 kWh/m².⁷³ Både erfarenhetsmässiga bedömningar och referenslitteratur tyder på att dessa värden är något låga⁷⁴, och fastighetselen antas istället kunna variera mellan 13 och 19 kWh/m². Antagen normalfördelning ger:

$$Q_{fhet} \in N(16, 1) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

7.2.6 Tillskottsvärme

Tillskottsvärmen består av solvärme, spillvärme och personvärme där alla poster antas variera.

Solvärme

Beräkningar i VIP+ för typhuset ger ett soltillskott på 19 kWh/m². Som komplement till beräkningarna i VIP+ beräknas även solvärmen enligt Karlssons fönsterformel.⁷⁵ Där multipliceras ackumulerad solinstrålning (för aktuellt väderstreck) med soltransmission och glasyta vid gränstemperaturen 12°C. Uppmätta värden för solinstrålningen är hämtade från Stockholm. Beräkningarna ger ett soltillskott på 18.35 kWh/m²,år. VIP+ beräkningar antas därmed vara ett rimligt medelvärde. Pga.

⁷¹ Almgren, Anders. Personlig kommunikation

⁷² Warfvinge, Catarina. Personlig kommunikation.

⁷³ JM-data.

⁷⁴ REPAB. Årskostnader för bostäder och Warfvinge, Catarina. Personlig kommunikation.

⁷⁵ Bulow-Hube, Helena. Personlig kommunikation.

diverse osäkerheter och förenklingar i beräkningsmodeller antas soltillskottet kunna variera mellan 16 och 22 kWh/m²,år. Antagen normalfördelning ger:

$$Q_{sol} \in N(19,1) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Spillvärme

Värme genereras genom användning av hushållsapparater, belysning och varmvattensystemet och kommer huset tillgodo i form av s.k. spillvärme. Spillvärmens beräknas därför som en procentsats av energin till hushållet och tappvarmvattnet.

$$Q_{spill} = p_{hhel} \cdot Q_{hhel} + p_{tvv} \cdot Q_{tvv}$$

Hushållselen uppskattas med värden från bostäderna i Stockholm och antas variera mellan 18 och 32 kWh/m².⁷⁶ Antagen normalfördelning ger:

$$Q_{hhel} \in N(25,2.3) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Andelen hushållsel som kommer huset tillgodo i form av värme antas variera mellan 60 och 80 %.⁷⁷ Antagande om normalfördelning ger:

$$p_{hhel} \in N(0.7,0.033)$$

Den del av energi till tappvarmvattnet som tillgodogörs som spillvärme är betydligt lägre än delen hushållsel, vilket beror på att den mesta värmen försvinner med avloppsvattnet. Det mesta tappvarmvatten förbrukas i badrummet, vilket gör att värmen inte kommer övriga bostaden tillgodo. Kallvattenanvändningen kylvärmer bostaden. Bruttospillvärmens från vattensystemet (dvs. både kallvattnet och varmvattnet) antas variera mellan 5 och 15%.⁷⁸ Antagen normalfördelning ger:

$$p_{tvv} \in N(0.10,0.017)$$

Personvärme

Boverkets schablonvärde för tillskottsvärme från personer är 1W/m², vilket motsvarar ett årligt tillskott på 8.76 kWh/m². Erfarenhetsmässiga bedömningar tyder på att schablonen är en rimlig uppskattning.⁷⁹ Här antas schablonvärdet kunna variera +/-25 %, och tillskottsvärmen från personer varierar mellan 6.5 och 11 kWh/m². Antagen normalfördelning ger:

$$Q_{pers} \in N(8.76,0.7) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

⁷⁶ JM-data.

⁷⁷ Dyrstad Pettersen, Trine. *Uncertainty analysis of energy consumption in dwellings*.

⁷⁸ Ibid.

⁷⁹ Warfvinge, Catarina och Almgren, Anders. Personlig kommunikation.

7.2.7 Återvinning

Typhuset har en värmepump med uppgiven värmefaktor 3 och med effekten 20 kW.⁸⁰

$$Q_{\text{åter}} = (v-1) * Q_{\text{el_värmepump}}$$

Värmefaktorn kan variera, beroende på temperatur, prestanda etc. Tidigare erfarenheter av värmepumpar tyder på att den verkliga värmefaktorn ofta är lägre än den uppgivna.⁸¹ Det är därför rimligt att använda det uppgivna värdet som maxvärde. Värmefaktorn antas därför kunna variera mellan 2 och 3.

$$v \in N(2.5, 0.17)$$

Värmepumpen värmer vatten till radiatorerna, och används således endast under uppvärmningssäsongen, dvs. 8 mån/år eller 243 dagar/år. Effekten från värmepumpen är 20 kWh, räknat med en värmefaktor på 2.5 blir tillsatt effekt 8 kW. Detta ger ett årligt elbehov på 18.8 kWh/m².

Alternativt kan elbehovet behandlas som en variabel: värmefaktorn varierar mellan 2 och 3, behov av tillsatt effekt varierar således mellan 6.7 och 10 kW. Elbehovet till värmepumpen varierar mellan 15.9 och 23.6 kWh/m², år. Här är det viktigt att notera korrelationen mellan värmefaktorn och elbehovet till värmepumpen. Elbehovet är omvänt proportionellt till värmefaktorn och korrelationskoefficienten är således -1. För att underlätta simuleringarna kommer dock elbehovet till värmepumpen behandlas som en konstant.

⁸⁰ Skanska Teknik. *Projektbeskrivning "Moderna Hus"*.

⁸¹ Dyrstad Pettersen, Trine. *Uncertainty analysis of energy consumption in dwellings*.

8 Simulering: resultat och analys

Här presenteras och analyseras resultaten från simuleringarna. Resultaten redovisas först individuellt för att sedan jämföras med varandra. Vidare diskuteras energianvändningens spridning för de olika drifttyperna samt skillnad i brottsannolikhet. Kapitlet avslutas med ett förslag på utveckling av partialkoefficienter utifrån simuleringensresultaten.

Monte Carlo simuleringarna resulterar i en beräkning av energianvändningen för typhuset. Eftersom variablerna är stokastiska kommer även energianvändningen att återges i ett intervall. Då samtliga variabler är normalfördelade kommer även energianvändningen vara normalfördelad.⁸² I simuleringarna utförs även en tillförlitlighetsanalys där brottsannolikheten beräknas, dvs. sannolikheten för att den faktiska energianvändningen ("påfrestningarna") överstiger den maximalt tillåtna energianvändningen, Q_{BBR} ("bärförmåga").

För att undersöka vilka variabler som står för de största delarna av energiberäkningens osäkerhet genomförs också en känslighetsanalys. Känslighetsanalysen tar hänsyn både till hur stor variabeln är och hur mycket den varierar och förklaras i kapitel 5.2.4. De normerade värdena redovisas i ett tårtdiagram för att visualisera hur stor påverkningsgraden är för respektive variabel.

Resultaten redovisas för de olika drifttyperna var för sig för att sedan jämföras med varandra i analysdelen.

8.1 Resultat

Resultaten från simuleringarna visualiseras både i ett fördelningsdiagram och ett täthetsdiagram, där både Q_{BBR} och faktisk energianvändning åskådliggörs. För att beräkna brottsannolikheten införs en hjälpfunktion, som utgörs av bärförmågan minus påfrestningarna. I hjälpfunktionens fördelningsdiagram kan brottsannolikheten utläsas, då den motsvarar funktionens alla negativa värden. För att underlätta förståelsen av brottsannolikheten inkluderas även hjälpfunktionens fördelningsdiagram.

⁸² Enligt centrala gränsvärdes satsen, se kapitel 4.

8.1.1 Referensdrift

För referensdrift simuleras spridningen av energianvändningen som enbart beror av husets prestanda. Här varierar därför typhusets värmegenomgångstal, ventilationsflöde, läckageflöde, drift- och reglerförluster, fastighetsel, soltillskott, värmetillskott från hushållsel och tappvarmvatten samt värmepumpens värmefaktor.

Variabler och konstanter för referensdrift

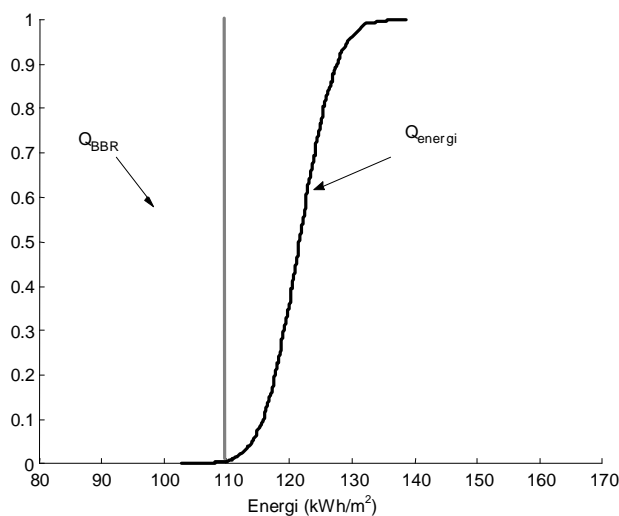
Variabel	Fördelning	Enhet
U_m	N(0.48,0.015)	W/m ² ,K
q_{vent}	N(0.335,0.005)	l/s,m ²
$q_{läck}$	N(0.12,0.0058)	l/s,m ²
p_{dr}	N(0.075,0.0125)	-
Q_{fhel}	N(16,1)	kWh/m ²
Q_{sol}	N(19,1)	kWh/m ²
p_{hhel}	N(0.7,0.05)	-
p_{tvv}	N(0.1,0.017)	-
V	N(2.5,0.17)	-

Konstanter:

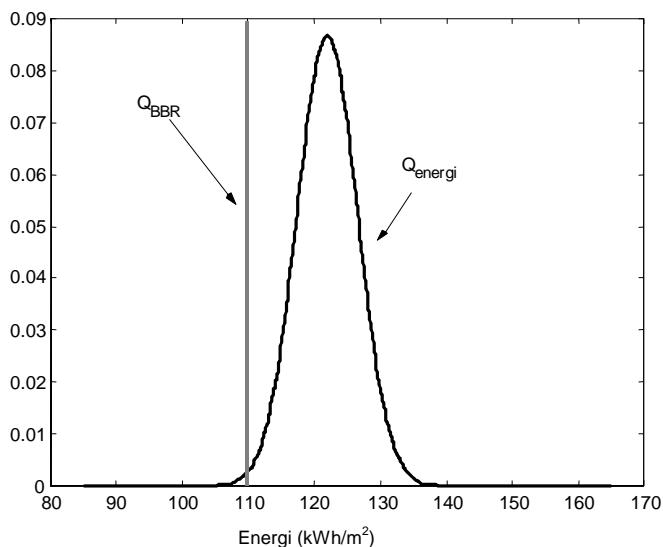
$T_i = 22.2 \text{ °C}$
 $Q_{tvv} = 30 \text{ kWh/m}^2$
 $Q_{hhel} = 25 \text{ kWh/m}^2$
 $Q_{person} = 8.76 \text{ kWh/m}^2$
 $A_{om}/A_{BRA} = 0.882$
 $T_u = 5 \text{ °C}$
 $t_{korr} = 8.76$
 $\rho = 1.205 \text{ g/l}$
 $c_p = 1.006 \text{ J/g}_{luft}, \text{ K}$
 $Q_{pump} = 18.8 \text{ kWh/m}^2$

Simulering av ursprungsscenario

Här simuleras energianvändningen för typhuset för referensdrift, se figur 8.1 och 8.2. Även maximalt tillåtet energibehov, Q_{BBR} syns i figurerna.



Figur 8.1 Fördelningsfunktion, referensdrift.



Figur 8.2 Täthetsfunktion, referensdrift.

Energianvändningens medelvärde beräknas till 122 kWh/m^2 och standardavvikelsen till 4.6 kWh/m^2 . Av centrala gränsvärdessatsen följer att spridningen är normalfördelad:

$$Q_{\text{energi, referens}} \in N(122, 4.6) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Den beräknade energianvändningen i typhuset, Q_{energi} , är påfrestningarna medan maximalt tillåten energianvändning, Q_{BBR} , är bärförmågan. Som syns i figur 8.1 och 8.2 är påfrestningarnas medelvärde betydligt högre än Boverkets föreslagna regler. Påfrestningarnas medelvärde är 122 kWh/m^2 medan bärförmågan är 110 kWh/m^2 . Detta är omvända förhållanden mot vad som vanligen observeras vid dimensionering med tillförlitlighetsanalys, där bärförmågan ofta har ett betydligt högre värde än påfrestningarna (se figur 5.1).

För att beräkna brottsannolikheten införs en hjälpfunktion, M , som är bärförmågan, R , (Q_{BBR}) minus påfrestningarna, S , (energianvändning). Hjälpfunktionen beräknas enligt ekvation 5.3:

$$M = R - S$$

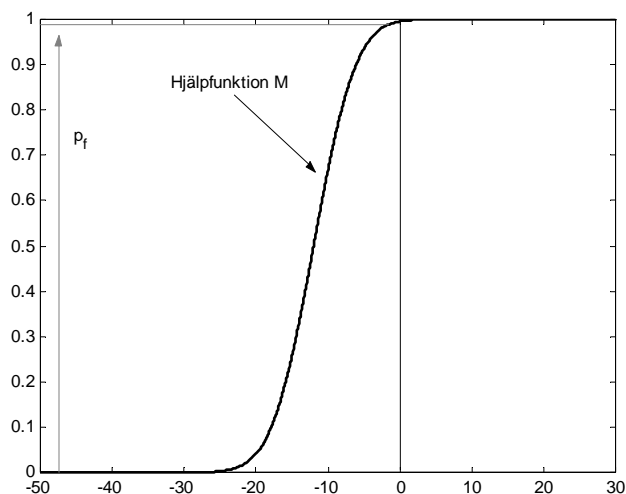
$$\mu_M = \mu_R - \mu_S$$

$$\sigma_M = \sqrt{(\sigma_R^2 - \sigma_S^2)}$$

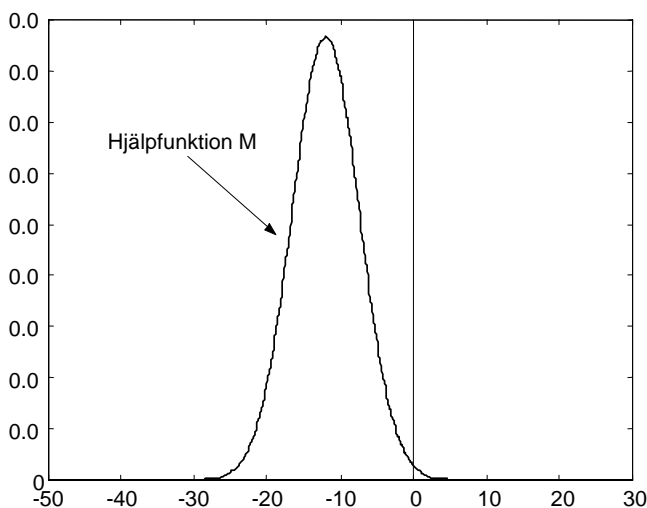
Eftersom bärförmågans standardavvikelse är 0 blir hjälpfunktionens standardavvikelse den samma som för påfrestningarna, medan medelvärdet förskjuts.

$$M \in N(-12, 4.6) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Hjälpfunktionen fördelningsfunktion illustreras i figur 8.3, där brottsannolikheten kan utläsas - brottsannolikheten utgörs av funktionens samtliga negativa värden. Figur 8.4 visar täthetsfördelningen.



Figur 8.3 Fördelningsfunktion M.



Figur 8.4 Täthetsfunktion M.

$$p_f = 0.99$$

Brottsannolikheten beräknas, dvs. sannolikheten för att påfrestningarna överstiger bärförmågan. Brottsannolikheten är 0.99 vilket betyder att 99 hus av 100 kommer att överskrida Q_{BBR} . En brottsannolikhet på 0.99 är att betrakta som väldigt hög. Som tidigare diskuterats i studien borde en rimlig brottsannolikhet ligga runt 0.1. Den simulerade energianvändningen är här betydligt högre än tidigare simuleringar för

samma hus.⁸³ Det relativt höga beräknade energibehovet och den höga brotts sannolikheten kan förklaras med att:

- Inga låga schablonvärden används i simuleringarna, värden på variabler och konstanter har istället baserat på analys av faktisk data i kombination med erfarenhetsmässiga bedömningar.
- Boverkets föreslagna energikrav kan vara alltför svåra att uppnå.

Viktigt att notera är att ett köpt energibehov på 122 kWh/m² (exklusive hushållsel) är inte att betrakta som ett högt värde, utan det är snarare lägre än energianvändningen i många liknande hus.⁸⁴

För att komma ner i en lägre och önskad brotts sannolikhet finns två alternativ: att öka bärformågan eller att minska påfrestningarna. I detta fall betyder det antingen att öka gränsen för maximal tillåtet energibehov eller att minska husets energianvändning.

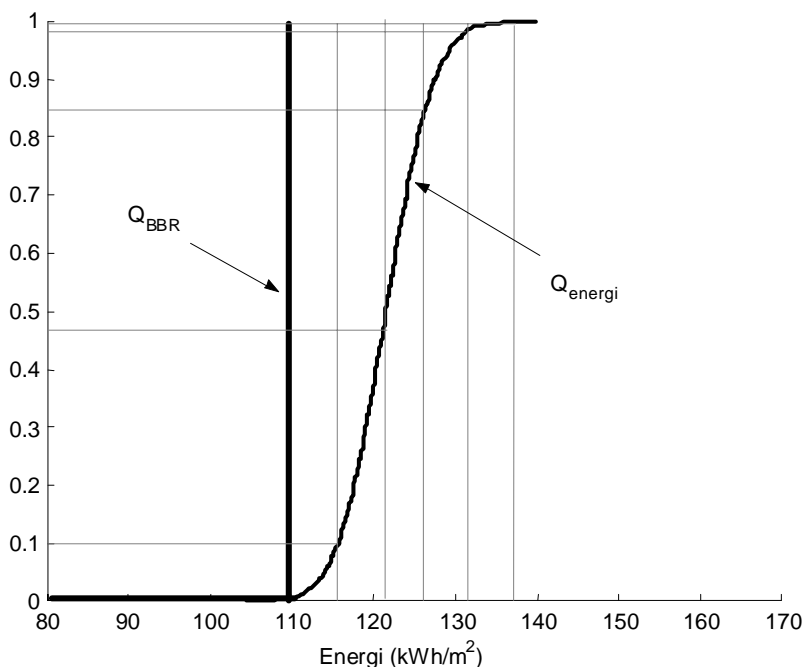
Då typhusets variabler redan är definierade i studien kommer inte påfrestningarna att minskas. Istället ökas bärformågan genom att öka maximal tillåten energianvändning med 5, 10, 15, 20 och 25 %. Detta görs för att se hur mycket det maximalt tillåtna energibehovet måste öka för att brotts sannolikheten ska komma ner i en rimlig nivå. Denna operation görs främst för att åskådliggöra hur brotts sannolikheten ändras då bärformågan ökas. Det är förstås inte tänkt att samhällets krav ska ändras för att passa en byggnad utan tvärtom. Alternativt skulle påfrestningarna kunna minskas genom att t ex öka husets isolergrad och sänka innetemperaturen. Detta kan göras i en mängd kombinationer men utelämnas här eftersom simuleringarnas huvudsyfte är att illustrera hur tillförlitlighetsanalys kan utföras på energiberäkningen, och inte att ge förslag på hur man kan minska energibehovet i byggnader.

⁸³ Andersson, Sara och Nordström, Johanna. *Investeringskalkyl baserad på ett flerbostadshus energiprestanda.*

⁸⁴ SCB. *Energistatistik för flerbostadshus 2003.*

Simulering med ökad bärförmåga

I figur 8.5 ses resultaten med ökad bärförmåga. De grå linjerna representerar ökningarna i bärförmåga med 5, 10, 15 20 respektive 25% och motsvarar ett ”högsta tillåtet energibehov” på 115.5, 121, 126.5, 132 respektive 137.5 kWh/m².



Figur 8.5 Fördelningsfunktion för referensdrift med ökning av Q_{BBR} i 5 % intervall.

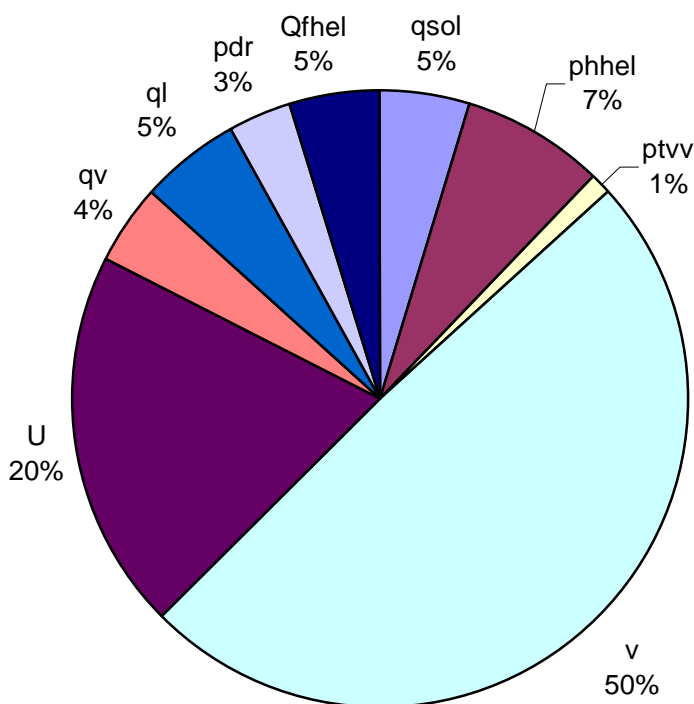
Tabell 8.1. Brottssannolikhet som funktion av bärförmågan.

Bärförmåga (kWh/m ² ,år)	Brottssannolikhet p_f
Q_{BBR}	0.99
$Q_{BBR} + 5 \% Q_{BBR}$	0.90
$Q_{BBR} + 10 \% Q_{BBR}$	0.56
$Q_{BBR} + 15 \% Q_{BBR}$	0.14
$Q_{BBR} + 20 \% Q_{BBR}$	0.01
$Q_{BBR} + 25 \% Q_{BBR}$	0.0002

Resultatet visar att en ökning i bärförmågan med 10 % reducerar brottssannolikheten till 0.56. För att brottssannolikheten ska minska till 0.1 måste bärförmågan vara 128 kWh/m², vilket motsvarar en ökning i bärförmåga på 16-17 %.

Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen görs för att undersöka vilka variabler som påverkar spridningen i energianvändningen för referensdrift mest. Känslighetsanalysen visar att värmepumpens värmefaktor påverkar energianvändningens osäkerhet mest, se figur 8.6. Även värmegenomgångstalet U_m har en betydande roll för spridningen. Den stora påverkan från värmepumpens värmefaktor kan förklaras med den ansatta spridningen på +/-20 % för värmefaktorn (varierar mellan 2 och 3), i kombination med att värmepumpen genererar 20 kW, vilket är en betydande del av energibehovet.



Figur 8.6 Känslighetsanalys av variablernas betydelse för energianvändningens spridning i referens drift.

8.1.2 Aktuell drift

För den aktuella driften varierar både de variabler som beror av husets prestanda och av brukarna. Den aktuella driften indikerar alltså vilken spridning och medelvärde energianvändningen får i realiteten - där osäkerheter kan kopplas både till själva huset och till dem som använder huset.

Variabler och konstanter

Variabel	Fördelning	Enhet
U_m	N(0.48,0.015)	W/m ² ,K
T_i	N(22.2,1.14)	°C
q_{vent}	N(0.335,0.005)	l/s,m ²
$q_{läck}$	N(0.12,0.017)	l/s,m ²
p_{dr}	N(0.075,0.0125)	
Q_{tvv}	N(30,2)	kWh/m ²
Q_{fhel}	N(16,1)	kWh/m ²
Q_{sol}	N(19,1)	kWh/m ²
Q_{hhel}	N(25,2.3)	kWh/m ²
p_{hhel}	N(0.7,0.05)	
p_{tvv}	N(0.1,0.017)	
Q_{person}	N(8.76,0.7)	kWh/m ²
V	N(2.5,0.17)	

Konstanter:

$$A_{om}/A_{BRA} = 0.882$$

$$T_u = 5 \text{ °C}$$

$$t_{korr} = 8.76$$

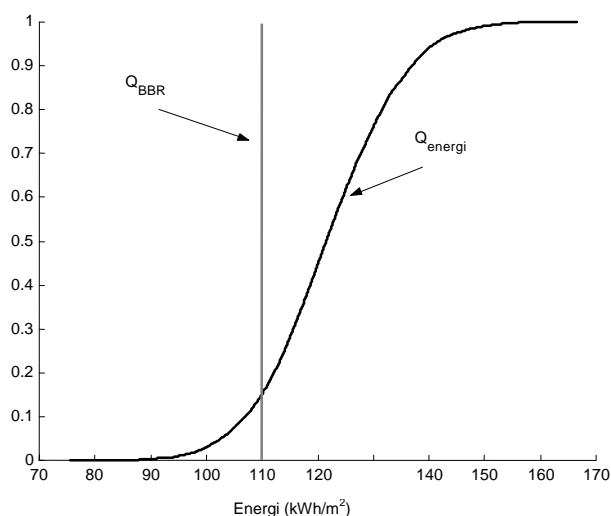
$$\rho = 1.205 \text{ g/l}$$

$$c_p = 1.006 \text{ J/g}_{luft}, \text{ K}$$

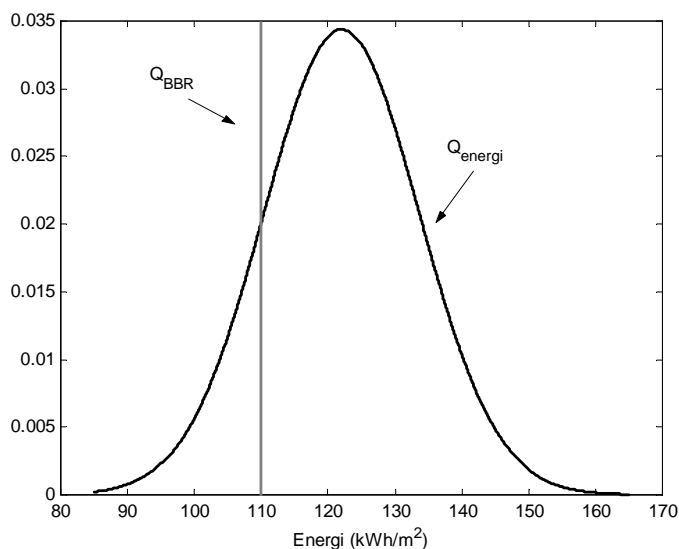
$$Q_{pump} = 18.8 \text{ kWh/m}^2$$

Simulering av ursprungsscenario

Figur 8.7 och 8.8 visar energianvändningens spridning samt fördelning för den aktuella driften. Även maximalt tillåtet energibehov är indikerat i figurerna.



Figur 8.7 Fördelningsfunktion för aktuell drift.



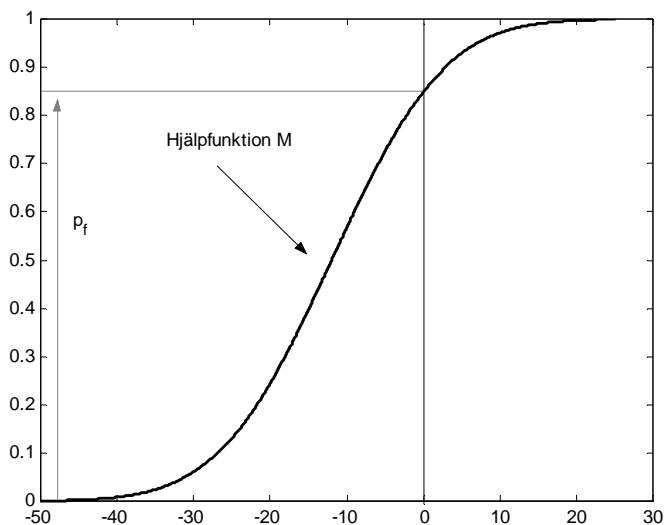
Figur 8.8 Täthetsfunktion för aktuell drift.

För den aktuella driften varierar energianvändningen mellan 87 och 156 kWh/m², se figur 8.7. Medelvärdet är 122 kWh/m² och standardavvikelsen 11.6 kWh/m². Av centrala gränsvärdessatsen följer att energianvändningen är normalfördelad:

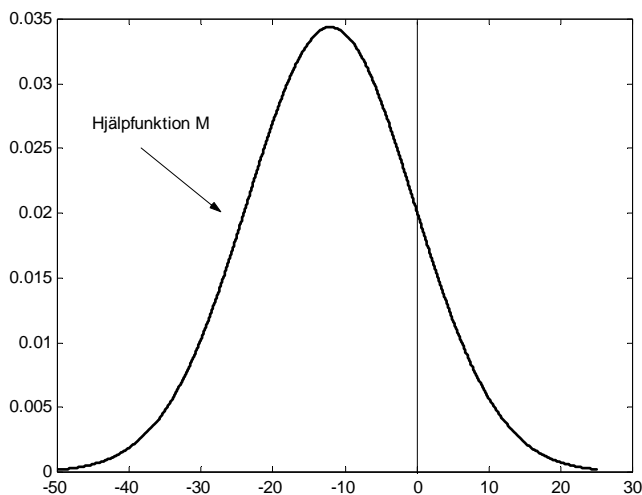
$$Q_{\text{energi,aktuell}} \in N(122,11.6) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

En hjälpfunktion införs för att beräkna brottsannolikheten.

$$M \in N(-12,11.6) \quad [\text{kWh/m}^2]$$



Figur 8.9 Fördelningsfunktion M.



Figur 8.10 Täthetsfunktion M.

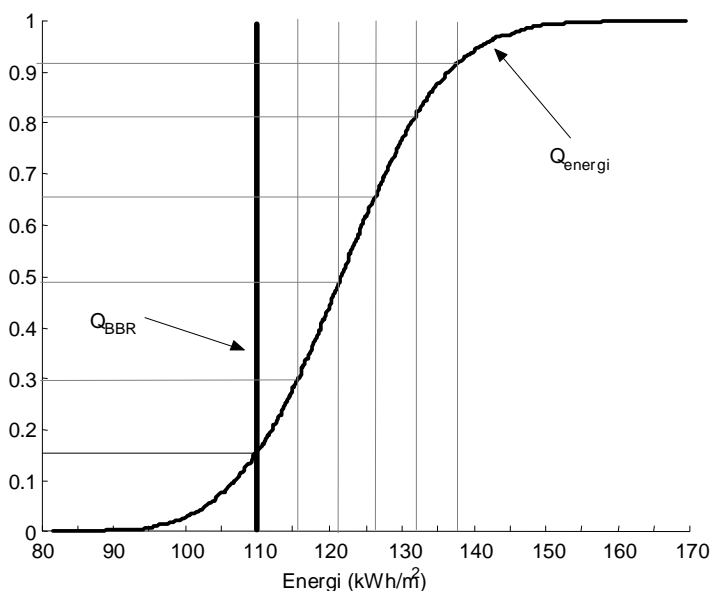
$$p_f = 0.84$$

Brottsannolikheten att energianvändningen överskrider Q_{BBR} är 0.84. Detta innebär att ungefär 6 hus av 7 inte klarar Boverkets föreskrivna regler.

Simulering med ökad bärförmåga

Liksom för referensdriften ökas bärförmågan för att nå en eftersträvd brottsannolikhet på 0.1.

Q_{BBR} ökas med 5, 10, 15, 20 och 25 %, se figur 8.11.



Figur 8.11 Fördelningsfunktion för aktuell drift med ökning av Q_{BBR} i 5 % intervall.

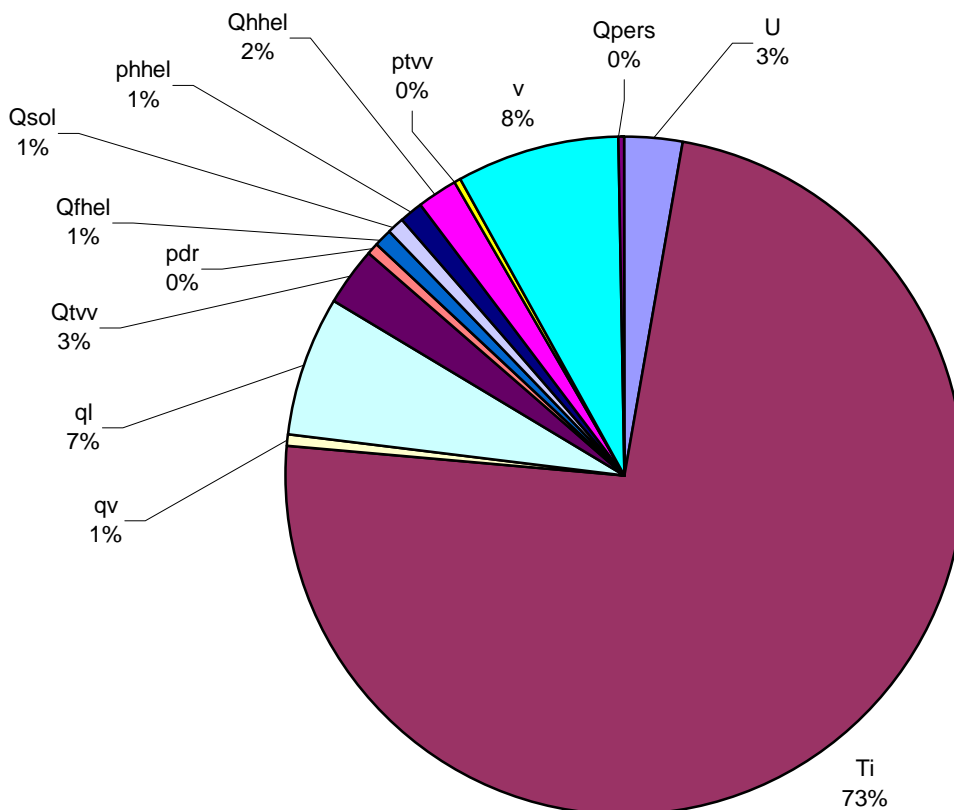
Tabell 8.2 *Brottsannolikhet som funktion av bärförmågan*

Bärförmåga (kWh/m ² ,år)	Brottsannolikhet p_f
Q_{BBR}	0.84
$Q_{BBR} + 5\% Q_{BBR}$	0.70
$Q_{BBR} + 10\% Q_{BBR}$	0.52
$Q_{BBR} + 15\% Q_{BBR}$	0.34
$Q_{BBR} + 20\% Q_{BBR}$	0.18
$Q_{BBR} + 25\% Q_{BBR}$	0.09

Resultatet visar att brottsannolikheten är ungefär 50 % då bärförmågan ökas med 10%. Om önskan är att inte fler än ett hus av tio ska överskrida bärförmågan måste bärförmågan ökas till 137 kWh/m² vilket betyder en ökning av Q_{BBR} med 24 %.

Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen visar att innetemperaturen står för den absolut största delen av spridningen av energianvändningen, se figur 8.10. Nästan tre fjärdedelar av osäkerheten i energiberäkningen kan knytas till innetemperaturen, som antas kunna variera mellan 19 och 25°C. Innetemperaturens stora betydelse för spridningen i energianvändningen förklaras med att innetemperaturen reglerar både transmissionsförlusterna, ventilations- och läckageförlusterna, drift- och reglerförlusterna samt spillvärmerna. Läckageflödet och värmepumpens värmefaktor visar sig även spela en betydande roll för variansen i energianvändningen.



Figur 8.12 Känslighetsanalys av variablernas betydelse för energianvändningens spridning i aktuell drift.

8.1.3 Brukardrift

I brukardriften varierar endast de delposter som är brukarberoende: innetemperaturen, läckageflöde från vädring, värme till tappvarmvattnet, hushållsel och personvärme. Alla parametrar som beror på husets utformning och prestanda sätts som konstanter. De konstanter som tidigare har varierat sätts till medelvärden.

Variabler och konstanter

Variabel	Fördelning	Enhet
T_i	N(22,2,1.14)	°C
$q_{läck}$	N(0.12,0.017)	l/s,m ²
Q_{tvv}	N(30,2)	kWh/m ²
Q_{hhel}	N(25,2.3)	kWh/m ²
Q_{person}	N(8.76,0.7)	kWh/m ²

Konstanter:

$$U_m = 0.48 \text{ W/m}^2, \text{K}$$

$$A_{om}/A_{BRA} = 0.882$$

$$T_u = 5 \text{ °C}$$

$$t_{korr} = 8.76$$

$$q_{vent} = 0.335 \text{ l/s,m}^2$$

$$\rho = 1.205 \text{ g/l}$$

$$c_p = 1.006 \text{ J/g}_{luft}, \text{K}$$

$$p_{dr} = 0.075$$

$$Q_{fhel} = 16 \text{ kWh/m}^2$$

$$Q_{sol} = 19 \text{ kWh/m}^2$$

$$p_{hhel} = 0.7$$

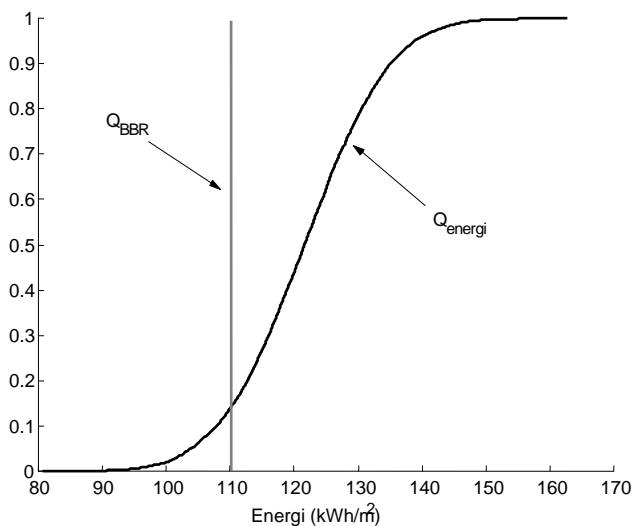
$$p_{tvv} = 0.1$$

$$v = 0.1$$

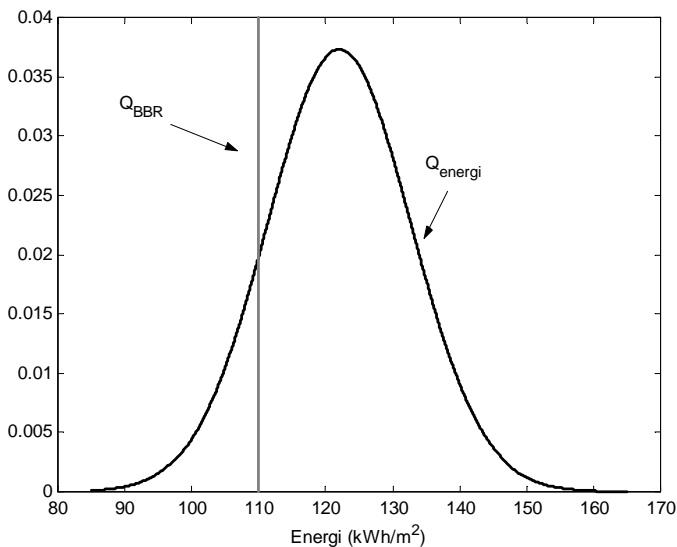
$$Q_{pump} = 18.8 \text{ kWh/m}^2$$

Simulering av ursprungsscenario

Resultaten från simuleringar för brukardriftens energibehov visas i figur 8.13 och 8.14.



Figur 8.13 Fördelningsfunktion, brukardrift.



Figur 8.14 Täthetsfunktion, brukardrift.

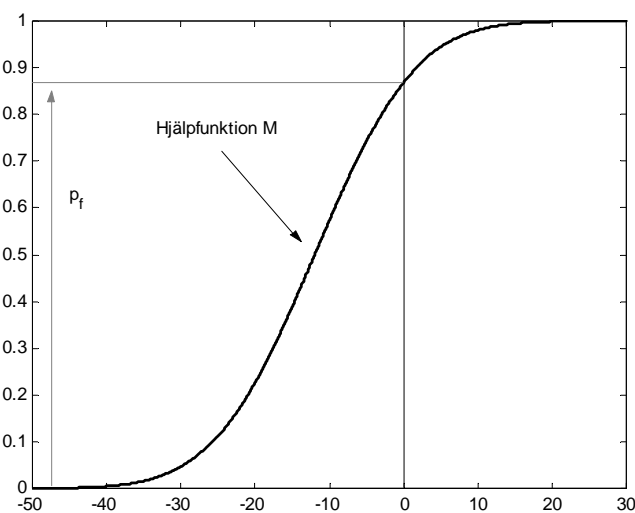
Beräknat energibehov varierar mellan 90 och 154 kWh/m² och har ett medelvärde på 122 kWh/m² med standardavvikelsen 10.7 kWh/m². Av centrala gränsvärdeessatsen följer att energianvändningen är normalfördelad:

$$Q_{\text{energi,brukare}} \in N(122,10.7) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

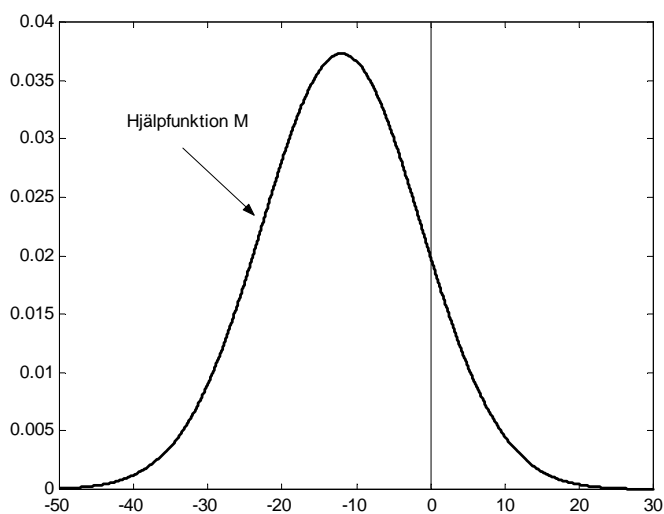
En hjälpfunktion, M , införs för att beräkna brotts sannolikheten.

$$M \in N(-12,11.6) \quad [\text{kWh/m}^2]$$

Hjälpfunktionen illustreras i figur 8.14 och 8.15.



Figur 8.14 Fördelningsfunktion M .

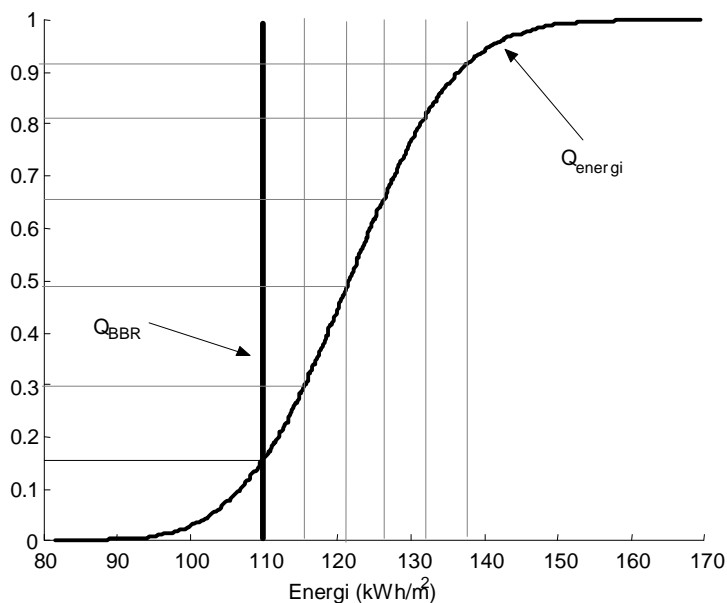


Figur 8.15 Tæthetsfunktion M.

$$p_f = 0.84$$

Simulering med ökad bärförmåga

Liksom för referens- och aktuell drift beräknas brottsannolikheten för ökning i bärförmåga. Bärförmågan ökas med 5, 10, 15, 20 respektive 25 % av Q_{BBR} . I figur 8.16 indikerar de grå linjerna de ökade bärförmågorna.



Figur 8.16 Fördelningsfunktion för brukardrift med ökning av Q_{BBR} i 5 % intervall.

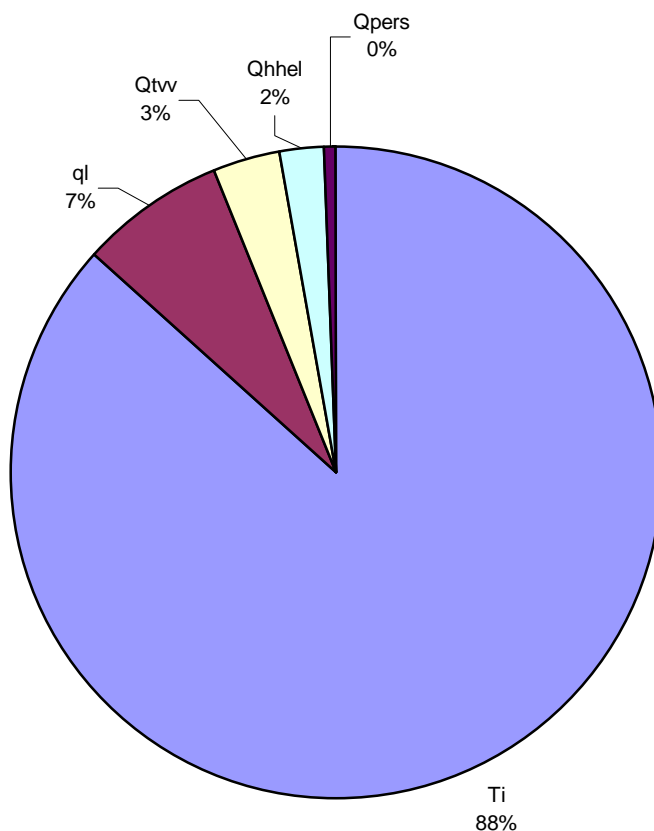
Tabell 8.3 Brottssannolikhet som funktion av bärformågan

Bärformåga (kWh/m ² ,år)	Brottssannolikhet p_f
Q_{BBR}	0.86
$Q_{BBR} + 5\% Q_{BBR}$	0.71
$Q_{BBR} + 10\% Q_{BBR}$	0.515
$Q_{BBR} + 15\% Q_{BBR}$	0.32
$Q_{BBR} + 20\% Q_{BBR}$	0.17
$Q_{BBR} + 25\% Q_{BBR}$	0.07

För att uppnå en önskad brottssannolikhet på 0.1 måste bärformågan ökas till 136 kWh/m² vilket motsvarar en ökning av Q_{BBR} med 23 %.

Känslighetsanalys

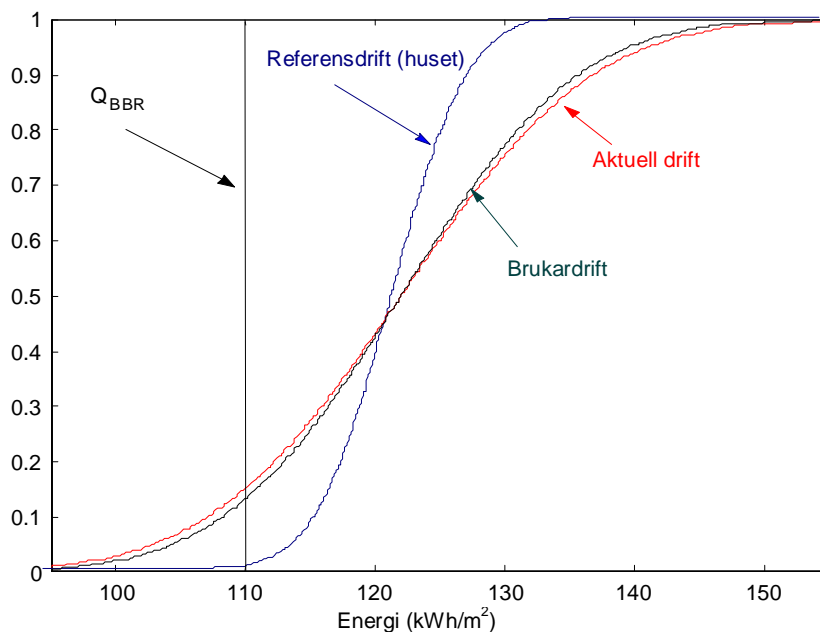
I känslighetsanalysen, se figur 8.17, är det tydligt att innetemperaturen är den variabel som påverkar spridning i beräknat energibehov för brukardrift mest. Här är innetemperaturen än mer betydelsefull än för aktuell drift, vilket förklaras med att antalet variabler i brukardrift är betydligt färre.



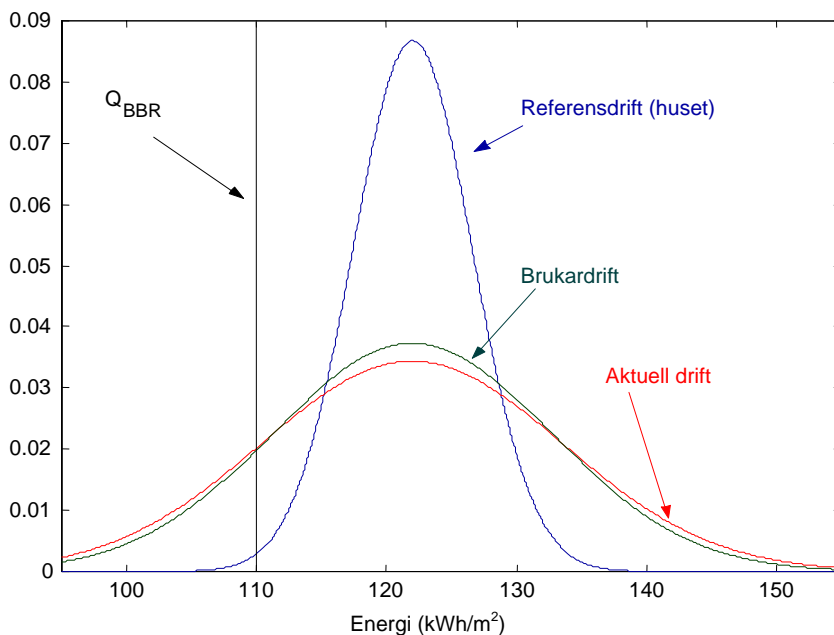
Figur 8.17 Känslighetsanalys av variablernas betydelse för energianvändningens spridning i brukardrift.

8.2 Analys av simuleringsresultat

För att illustrera hur de olika drifttyperna varierar plottas energianvändning för referens-, aktuell och brukardrift i samma diagram, se figur 8.18. I figur 8.19 illustreras skillnad i spridning.



Figur 8.18 Fördelningsfunktion för referens-, aktuell och brukardrift.



Figur 8.19 Täthetsfunktion för referens-, aktuell och brukardrift.

Som mått på en fördelnings spridning används variationskoefficienten, som är standardavvikelsen dividerat med medelvärdet. Samband mellan brottsannolikhet och variationskoefficient syns i tabell 8.4.

Tabell 8.4 Jämförelse av medelvärde, standardavvikelse och brottsannolikhet.

Typ av drift	Medelvärde (kWh/m ²)	Standardavvikelse (kWh/m ²)	Variationskoefficient R	Brottsannolikhet p_f
Referensdrift	122	4.6	0.038	0.99
Aktuell drift	122	11.6	0.095	0.84
Brukardrift	122	10.7	0.088	0.86

8.2.1 Spridning/osäkerhet

I figurerna 8.18 och 8.19 syns tydligt att referensdrift varierar betydligt mindre än både aktuell och brukardrift. Detta kan även utläsas ur variationskoefficienterna, för referensdrift är R endast 40 % av R för aktuell drift. Detta betyder att beräknat energibehov för aktuell drift varierar 2.5 gånger mer än för referensdriften. Mellan brukar- och aktuell drift skiljer det mycket lite, R för brukardriften är bara 8 % mindre än för aktuell drift. Energianvändningens intervall är sålunda betydligt mindre för referensdriften än för de två andra drifttyperna. Ju större variationskoefficienten är, desto högre är graden av osäkerhet. Alltså innehåller beräknat energibehov för referensdrift mindre osäkerheter än beräkningarna för aktuell och brukardrift. Beräknad energianvändning för referensdrift kan bestämmas mer exakt än för de andra drifttyperna.

De största osäkerheterna/den största spridningen återfinns i den aktuella driften, vilket förklaras med att denna drift omfattar osäkerheter som kan knytas till både brukaren och husets prestanda. Det skiljer dock mycket lite mellan graden av osäkerhet mellan aktuell drift och brukardrift. Detta betyder att den största delen av osäkerheten i beräknad energianvändning för den aktuella driften kan knytas till brukarberoende parametrar. Husets prestanda påverkar följaktligen inte variansen i den totala energianvändningen särskilt mycket. Att de brukarberoende parametrarna är mest betydelsefulla kan även utläsas i känslighetsanalysen för aktuell drift, se figur 8.12.

Känslighetsanalysen i kapitel 8.1 visar att innetemperaturen står för den absolut största delen av osäkerheten för både aktuell och brukardrift. Om önskan är att energianvändningen för dessa drifttyper ska kunna bestämmas mer precist måste även innetemperaturen kunna bestämmas mer exakt. Posten bestäms i hög grad av brukaren, där preferenserna för val av temperatur varierar mycket. Det är därför svårt att bestämma innetemperaturen mer exakt.

Det går däremot att styra brukare mot lägre innetemperatur genom att införa maxtemperatur och att debitera brukarna individuellt. I villor, där de boende själva står för kostnaderna, är innetemperaturen i genomsnitt betydligt lägre än i lägenheter.⁸⁵ På detta sätt kan alltså innetemperaturens genomsnitt sänkas, men

⁸⁵ ELIB. *Bostadsbeståndets inneklimat*.

ingenting tyder på att spridningen minskar. Tvärtom är det troligt att spridningen ökar då vissa väljer att spara in extra på värmen medan andra fortsätter med samma innetemperatur. Samma resonemang kan föras för både varmvattenanvändning, vädringsbeteende och hushållsel: det finns metoder för att påverka de brukarberoende parametrarna för att i *genomsnitt* minska energianvändningen. Detta betyder inte att *spridningen* av dessa parametrar minskar, utan enbart att energianvändningen i genomsnitt minskar.

För de prestandaberoende parametrarna är det enklare att minska den spridning som existerar genom att t ex noggrannare beräkna köldbryggor och utöka kontroll vid uppförandet. Införandet av prefabricerade element torde minska spridningen i värmegenomgångstal, då hela partier kan byggas med högre precision. Även återvinningssystemets faktiska effekt skulle kunna bestämmas mer exakt om apparatur kontrollerades noggrant och servades med jämna mellanrum.

För referensdriften visar känslighetsanalysen att värmepumpens värmefaktor står för de största delarna av osäkerheter i beräknat energibehov, betydligt större än osäkerheter i klimatskalets isolergrad. Resultatet kan ifrågasättas, det är möjligt att värmefaktorns ansatta spridning är alltför stor. Samtidigt har osäkerheter i återvinningssystemets verkningsgrad varit del av orsakerna bakom flera felkalkylerade energiestimeringar för bostäder, t ex lågenergihuset i Gumlöv⁸⁶ och Yxhult-huset i Västra Hamnen⁸⁷.

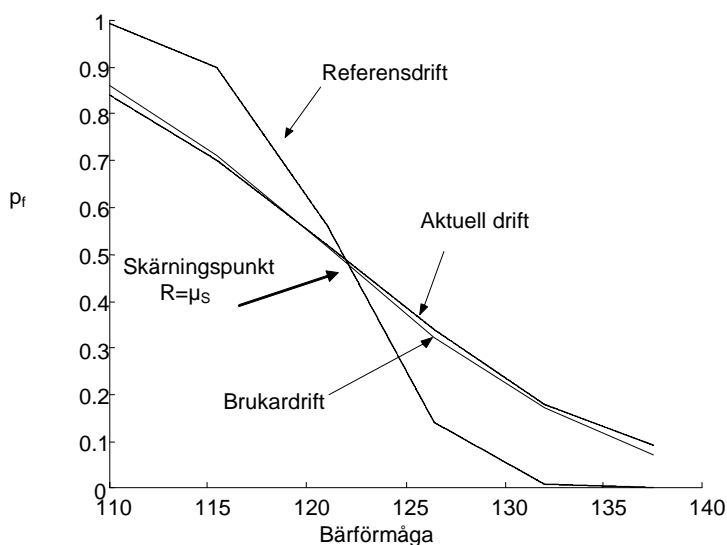
8.2.2 Brottssannolikhet

Eftersom brukarberoende variabler har satts till genomsnittligt värde för referensdriften och prestandaberoende parametrar satts till genomsnittet för brukardriften följer att det beräknade energibehovets medelvärde är detsamma för samtliga drifttyper. Medelvärdet för påfrestningarna (energianvändningen) är högre än värdet på bärförmågan (Q_{BBR}). Eftersom spridningen är störst hos den aktuella driften följer att brottssannolikheten är lägst för den aktuella driften. Då energibehovet varierar i ett större intervall är det en större sannolikhet att den hamnar under Q_{BBR} , dvs. under 110 kWh/m^2 (se figur 8.18 och 8.19).

Om bärförmågan sätts högre, till ett värde som ligger över påfrestningarnas medelvärde, blir brottssannolikheten lägre för den drifttyp med minst spridning (referensdriften). Brottssannolikheten som funktion av bärförmågan plottas i figur 8.20.

⁸⁶ Adalberth, Karin. Personlig kommunikation.

⁸⁷ Bagge, Hans, Elmrot, Arne och Lindström Lotti. *Energianvändning och inneklimat i två energieffektiva småhus i Västra Hamnen i Malmö.*



Figur 8.20 Brott sannolikhet som funktion av bärförmågan.

Brott sannolikheten är högre för referensdriften än för aktuell/brukardriften så länge bärförmågan är lägre än påfrestningarnas medelvärde, se skärningspunkten då bärförmågan är exakt lika med påfrestningarnas medelvärde i figur 8.20. Till höger om skärningspunkten är brott sannolikheten lägst för referensdriften. Alltså: precis då bärförmågan blir större än påfrestningarnas medelvärde blir brott sannolikheten lägre för referensdriften. Detta följer av referensdriftens relativt lilla spridning.

Om det är önskvärt med en så låg brott sannolikhet som möjligt är det endast positivt att ha en påfrestning som varierar så lite som möjligt i de fall då bärförmågan är större än påfrestningarnas medelvärde.

8.2.3 Partialkoefficienter

Vid dimensionering av konstruktioner är bärförmågans medelvärde ofta högre än påfrestningarnas medelvärde, se figur 5.1. I partialkoefficientmetoden ökas påfrestningarna medan bärförmågan minskar med hjälp av partialkoefficienter för att nå gränstillståndet då påfrestningarna är lika stora som bärförmågan.

I simuleringarna ovan är förhållandena de omvända; påfrestningarnas medelvärde är högre än bärförmågan (som här är deterministisk). Det går således inte att applicera partialkoefficienter på ursprungsscenarioet för att nå gränstillståndet eftersom det redan är överskridet. Däremot går det att överföra metodiken för ett scenario med ökad bärförmåga.

Då bestämningen av partialkoefficienter är beroende av olika faktorer och då vald data innehåller många osäkra element är det inte relevant att här ge några exakta

förslag på koefficienter. Däremot kan simuleringsresultaten användas för att indikera storleksordning på partialkoefficienter.

Partialkoefficientmetoden är deterministisk, vilket innebär att samtliga variabler måste sättas till ett fixt värde. Utgångspunkten för det ansatta värdet är variabelernas medelvärde. Genom att sedan studera variabelernas fördelningar kan de karakteristiska värdena bestämmas. Karakteristiska lastvärden inom konstruktionstekniken utgörs av 98 % fraktilen vilket är den last som i genomsnitt överskrider var 50:e år. Då brottsannolikheten är betydligt högre för energiberäkningen än vid dimensionering är det rimligt att de karakteristiska värdena utgörs av ett värde som återkommer betydligt oftare, t ex femårs lasten/80 % fraktilen. De karakteristiska värdena multipliceras/divideras sedan med partialkoefficienter för att maximera påfrestningarna, se kapitel 6.2.

Eftersom bärförmågan är deterministisk sätts dess karakteristiska värde till dess faktiska värde och dess partialkoefficient sätts till 1.0.

För aktuell drift är innetemperaturen den överlägset mest betydande parametern för energiberäkningens spridning. Innetemperaturen bör därför multipliceras med en relativt stor partialkoefficient. Det är också rimligt att sätta innetemperaturen som ”huvudlast” och att reducera övriga laster med en lastreduktionsfaktor.

9 Diskussion och slutsatser

I kapitlet diskuteras vilka slutsatser som kan dras utifrån studien: dels från applikation av konstruktionsteknikens metoder och dels utifrån de faktiska simuleringsresultaten.

9.1 Metodutveckling för hantering av osäkerheter i energiberäkningar för bostadshus

Studien presenterar en ny metod för att beräkna energibehov i bostadshus. Metoden tar hänsyn till osäkerheter i energiberäkningen genom att betrakta variablernas osäkerheter individuellt. I metoden uppskattas energiberäkningens totala osäkerhet genom att det beräknade energibehovet anges i ett intervall. Sannolikheten för att det faktiska energibehovet ska anta ett visst värde i det uppgivna intervallet kan också beräknas utifrån metoden.

Energiberäkningar utförda enligt studiens metod skiljer sig från beräkningar i dagens energiberäkningsprogram, där energibehovet anges som ett fixt tal. Det beräknade energibehovet fås här som en fördelning med ett medelvärde och en standardavvikelse. Många av energiberäkningens variabler är svåra/omöjliga att bestämma exakt och det är därför en teoretisk omöjlighet att bestämma energibehovet exakt, även om energiberäkningen utförs på ett korrekt sätt. Att beräkna energibehovet i ett intervall är ett sätt att hantera de osäkerheter som existerar. Då dagens energiberäkningar sällan stämmer med faktisk energianvändning är det mer sanningsenligt att ange ett intervall där den faktiska energianvändningen med stor sannolikhet kommer att hamna. Det är också ett sätt att transparent uppvisa energiberäkningens osäkra element. Metoden torde därmed öka energiberäkningars trovärdighet.

I studiens simuleringar uppvisas hur metoden kan användas i praktiken. Metoden är enkel att använda då variablernas variabilitet är kända. Schematiskt kan metoden (här kallad ”studiens metod”) beskrivas:

1. Definiera energiberäkningen och identifiera variabler och konstanter, beroende på om det är aktuell drift eller referensdrift (huset) som ska undersökas.
2. Undersök hur variablerna varierar genom att analysera data eller genom erfarenhetsmässiga uppskattningar. Samtliga variabler måste tilldelas en fördelning med medelvärde och standardavvikelse.
3. Ansätt korrekta värden på konstanterna.
4. Beräkna energibehovet genom att utföra ett högt antal beräkningar, där varje beräkning bygger på slumpade tal från variablernas fördelningar. Detta resulterar i en mängd värden på energibehovet. Summera resultaten till en fördelning med medelvärde och standardavvikelse. Detta görs enklast med en statistisk simuleringsmetod, i studien används Monte Carlo simulering i Matlab.
5. Beräkna sannolikheten för att byggnadens energibehov kommer att överskrida samhällets krav på maximalt tillåtet energibehov.

I applikationen av tillförlitlighetsanalysen introduceras en enkel metod för att se hur sannolikt det är att ett bostadshus energibehov klarar samhällets krav på energiprestanda.

I studien är samhällets krav på energiprestanda representerat av Boverkets föreslagna regler för maximalt tillåtet energibehov. Boverkets föreslagna regler är ett absolut krav på att energianvändningen inte får överstiga 110/130 kWh/m². Eftersom energiberäkningen innehåller flera osäkerheter är det omöjligt att garantera att energikraven uppfylls. Reglerna skulle istället kunna utformas som en högsta tillåten brotts sannolikhet, t ex sannolikheten att den faktiska energianvändningen överskrider 110/130 kWh/m² får inte vara större än t ex 0.1. Då Boverkets konstruktionsregler är utformade på detta sätt borde inte teorin vara svår att applicera på Boverkets byggregler. Tillförlitlighetsanalysen i studien presenterar en verifikationsmetod för att se att en ansatt högsta tillåten sannolikhet inte överskrids.

Partialkoefficientmetoden används vid dimensionering och är en förenklad verifikationsmetod för tillförlitlighetsanalysen. I studien ges en teoretisk applikation av metoden för energiberäkningar för bostadshus. Det är tydligt att partialkoefficientmetoden är möjlig att använda även för energiberäkningar. För att metoden ska kunna användas på ett tillfredställande sätt krävs tillförlitliga partialkoefficienter och karakteristiska värden. Inom konstruktionstekniken har dessa värden och koefficienter utvecklats under en 30-års period. Även för bostäders energiberäkningar skulle en omfattande och tidskrävande utveckling av koefficienter behövas för att partialkoefficientmetoden ska kunna användas för energiberäkningar för bostadshus.

Det kan vid första anblick verka invecklat att applicera partialkoefficientmetoden på energiberäkningar för bostadshus. I studien ges endast en teoretisk överblick för hur metoden skulle kunna användas. Den stora fördelen med metoden är att den erbjuder ett enkelt sätt att verifiera att brotts sannolikheten inte överskrids. Ur ett användarperspektiv är partialkoefficientmetoden att föredra framför studiens metod.

Tillförlitlighetsanalys utförd enligt studiens metod är ett första steg för utveckling av partialkoefficientmetoden, eftersom den fokuserar på variabelernas individuella osäkerheter och eftersom begreppet ”brotts sannolikhet” introduceras i energiberäkningssammanhang. Om studiens metod börjar användas för energiberäkningar skulle partialkoefficienter kunna utvecklas allt eftersom kunskapen om variabelernas variation förbättras.

I studien sätts den önskade brotts sannolikheten till 0.1, vilket betyder att en av tio byggnader i genomsnitt överskrider maximalt tillåtet energibehov. Denna nivå betyder också att byggnaders genomsnittliga energibehov kommer att vara lägre än maximalt tillåtet energibehov. Det är därför kanske rimligt att ansätta en högre brotts sannolikhet så att byggnaders genomsnittliga energibehov är detsamma som det maximalt tillåtna. Detta betyder en brotts sannolikhet på 0.5, dvs. att varannan byggnad inte klarar kraven.

9.2 Identifikation av energiberäkningens osäkra element

För att identifiera de mest osäkra elementen i energiberäkningen har studiens metod kompletterats med en känslighetsanalys, där variabelernas osäkerheter kvantifieras. Känslighetsanalysen tar hänsyn både till variabelns storlek och till dess variation. Genom att urskilja vilka variabler som står för de största delarna av variabiliteten i energiberäkningen är det enklare att hantera dessa osäkerheter. Detta kan göras på två sätt:

- Påverka variabeln så att dess variation minskar.
- Ta hänsyn till att variabeln varierar.

De variabler där det är möjligt att minska variationen är främst de prestandaberoende variablerna. Här kan variablerna bestämmas mer exakt genom att t ex noggrannare undersöka verkningsgraden för återvinningssystem, se till att isoleringen i klimatskalet blir den tänkta, genom att undvika köldbryggor osv. De flesta brukarberoende variabler är svårare att bestämma mer noga. Det är dock möjligt att göra en profilbedömning av vilken typ av brukare bostaden kommer att få, och sedan uppskatta variablerna med hänsyn till denna profil. Genom att insamla mer data från brukarberoende variabler borde variabiliteten kunna minskas något.

Många variabler går inte att bestämma mer exakt. Innetemperaturen kommer troligen alltid variera från brukare till brukare. Det är därför nödvändigt att utveckla tillvägagångssätt för att hantera dessa osäkerheter. Studiens metod ska ses som ett förslag till hur osäkerheterna kan behandlas. Om partialkoefficientmetoden ska användas är det rimligt att de osäkraste variablerna blir knutna till högre partialkoefficienter, för att säkerställa att brottsannolikheten inte överskrids.

9.3 Slutsatser utifrån simuleringsresultaten

Simuleringsavsnittet kan användas för att dra slutsatser på flera plan:

1. Huruvida studiens metod är lämplig att använda i praktiken.
2. Undersöka osäkra variabler, energianvändning och om samhällets energikrav uppfylls utifrån de faktiska simuleringsresultaten.

Simuleringarna visar att studiens metod med tillförlitlighetsanalys enkelt kan användas för att beräkna energibehov i bostadshus. Det är inga komplicerade beräkningar som behöver göras, en matlabfil för Monte Carlo simulering är tillräcklig. De svåra momenten är att avgöra hur variablerna faktiskt varierar och samvarierar. Metoden som sådan är alltså lätt att använda. Med verklighetstroga variabler och konstanter är metoden lämplig för att beräkna energibehov för bostäder.

De slutsatser som kan dras utifrån de faktiska simuleringsresultaten ska ses i sken av att många variabler är grovt uppskattade då tillgången på relevant data är begränsad. Detta tillsammans med att simuleringarna görs för ett typhus gör att resultaten inte kan generaliseras, utan ska ses som en indikation på hur energianvändningen kan variera och vilka variabler som tenderar att innehålla de största osäkerheterna.

Även om simuleringarna innehåller osäkra element kan resultaten vara vägledande. Resultaten indikerar att:

- Typhuset med hög sannolikhet inte kommer klara Boverkets föreslagna regler på maximalt tillåtet energibehov.
- De brukarberoende variablerna varierar betydligt mer än de prestandaberoende variablerna, och står för den absolut största delen av energiberäkningens variation.
- Bland de brukarberoende variablerna är innetemperaturen den mest betydelsefulla för spridningen i det beräknade energibehovet.

Det är viktigt att poängtera att typhuset inte har sämre prestanda än många liknade flerbostadshus. Isolergraden är 10 % bättre än vad nuvarande byggregler kräver.⁸⁸ Förutsatt att energibehovet i simuleringarna är relativt verklighetstroga är det troligt att många andra flerbostadshus inte heller kommer uppfylla Boverkets föreslagna regler.

Att de brukarberoende variablerna är svårare att bestämma än de prestandaberoende variablerna är rimligen en följd av att de är svåra att påverka utifrån. För att rättvist kunna jämföra olika bostadshus med varandra är det kanske mer relevant att studera referensdriften istället för den aktuella driften. För att få tillförlitliga energiberäkningar krävs dock att ”normalbrukarens” energianvändning studeras med hänsyn till vilken typ av bostad som studeras: hyresrätt/bostadsrätt, snålspolande/normalspolande vattenarmatur osv. Om de brukarberoende variablerna slentrianmässigt uppskattas genom schabloner riskerar detta att reducera energiberäkningens trovärdighet.

För mer tillförlitliga energiberäkningar är det mer relevant att undersöka de brukarberoende variablerna mer noggrant än att beräkna prestandaberoende variabler exakt. Idag beräknas t ex värmeresistansen i klimatskalet ofta med många decimaler. Om fokus istället lades på att identifiera brukarnas energibeteende borde energianvändningen kunna bestämmas mer tillförlitligt.

9.4 Fortsatt arbete

För att studiens metod ska kunna användas mer generellt behöver de ingående variablerna undersökas nog. Metodens trovärdighet bygger på att variablernas variation och samvariation är kända. En omfattande datainsamling för hur innetemperatur, läckageflöde, återvinningens verkningsgrad, varmvattenanvändning m.m. faktiskt varierar för olika klasser av bostadshus är nödvändig. En sådan datainsamling skulle vara både tidskrävande och kostsam. Samhällets nya direktiv om energideklaration och maximalt tillåten energianvändning kommer att generera extensiva datainsamlingar. Förhoppningsvis kan denna datamängd användas.

⁸⁸ Skanska Teknik. *Projektbeskrivning "Moderna Hus"*.

I studien sätts den önskade brotts sannolikheten till 0.1, vilket betyder att en av tio byggnader i genomsnitt överskrider maximalt tillåtet energibehov. Denna nivå betyder också att byggnaders genomsnittliga energibehov kommer att vara lägre än maximalt tillåtet energibehov. Det är därför kanske rimligt att ansätta en högre brotts sannolikhet så att byggnaders genomsnittliga energibehov är detsamma som det maximalt tillåtna. Om Boverkets krav ska kunna utformas som en maximalt tillåten sannolikhet för att energikraven inte uppfylls måste en brotts sannolikhet ansättas. Hur ett sådant regelverk ska utformas måste bestämmas genom dialog med representanter från Boverket, tillsynsmyndigheter, byggindustrin med flera.

10 Referenser

10.1 Tryckta Källor

Anger, Ylva och Ohlsson, Håkan. *Sänkta boendekostnader genom energieffektivisering. Balans mellan livcykel- och investeringskostnader i nyproducerade flerbostadshus*. Examensarbete, Avdelningen för installationsteknik, Lunds Tekniska Högskola 2004. Rapport TVIT-5002.

Adalberth, Karin. *Energy Use and Environmental Impact of New Residential Buildings. Doktorsavhandling*. Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola 2000. Rapport TVBH-1012

Bagge, Hans, Elmrot, Arne och Lindström Lotti. *Energianvändning och inneklimat i två energieffektiva småhus i Västra Hamnen i Malmö*. Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola 2004. Rapport TVBH-3048.

Blom, Gunnar. *Sannolikhetsteori och statistikteori med tillämpningar*. Studentlitteratur, Lund 2000. ISBN 91-44-03594-2.

Boverket: *Boverkets byggregler, BFS 1993:57 med ändringar t o m 2002:19*. Elanders Gotab, Vällingby 2002, Upplaga 4:1. ISBN: 91-7147-718-7

Boverket: *Regelverk för konstruktioner: Boverkets konstruktionsregler, BKR, Byggnadsverkslagen och Byggnadsverksförordningen*. Elanders Gotlab, Vällingby 2003. ISBN: 91-7147-740-3

Boverket. *Termiska beräkningar-Rumsklimat, värmeisolering, transmissionsförluster och omfördelningsberäkning*. Karlskrona 2003. ISBN:91-7147-770-5.

Carling, Olle: *Nordisk Limträhandbok*. Svensk Limträ AB 2001

CEN (European Committee for Standardization). *Energy performance in buildings- Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings*. Draft prEN 15217. Bryssel 2005-03.

Dyrstad Pettersen, Trine. *Uncertainty analysis of energy consumption in dwellings*. Doktorsavhandling. NTNU Trondheim. 1997.

ELIB. *Bostadsbeståndets inneklimat. Rapport nr. 7*. Byggnadsrådet, Stockholm 1993. ISBN:91-540-5569-5.

Elmrot, Arne. *Energianvändning i praktik och teori. Från analogin Effektivare energi i bostäder. En analogi om framtidens styrmedel*. Boverket, Energimyndigheten och Naturvårdsverket, 2002. ISBN:91-89184-29-7.

Isaksson, Tord, Mårtensson, Annika och Thelandersson, Sven. *Grunderna i Byggkonstruktion*. Avdelningen för konstruktionsteknik. Lunds tekniska högskola, Lunds Universitet 2005.

Köhler, Niclas. *Byggherrar räknar fel på energiförbrukningen*. Ny Teknik nr. 23 2003.

Köhler, Niclas. *Nybyggda bostadshus slukar allt mer energi*. Ny Teknik nr.18 2003.

Melchers, Robert E. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Second edition. University of Newcastle, Australia 2001. ISBN: 0471 98324 1.

Nilsson, Annika : *Energianvändningen i nybyggda flerbostadshus på Bo01-området i Malmö*. Licentiatavhandling. Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola 2003. Rapport TVBH-3045

NKB-skrift nr. 55 *Retningslinier for last- og sikkerhedsbestemmelser for bærende konstruktioner*. Den nordiske komité for bygningsbestemmelser. 1987

Person, Agneta. *Energianvändning i bebyggelsen. En faktarapport inom IVA-projektet energiframsyn Sverige i Europa*. Kungliga ingenjörsvetenskapsakademien IVA, Eskilstuna 2002.

REPAB. *Bostäder 2003, Nyckeltal för kostnader och förbrukningar*. REPAB AB 2003. ISSN 1404-6377.

Schultz, Linda. *Normalårskorrigerig av energianvändningen i byggnader - en jämförelse av två metoder*. Projektrapport nr. 2003:01, EFFEKTIV. ISBN:91-7848-932-6.

Warfvinge, Catarina. *Installationsteknik AK för V*. Avdelningen för installationsteknik. Institutionen för byggnad och arkitektur. Lunds Universitet 2002. Rapport TABK 94/7016.

Warfvinge, Catarina: *Kv Jöns Ols- energisnålt och lönsamt flerfamiljshus med konventionell teknik*. Konsultuppdrag Pnr 12809-1, Statens Energimyndighet, Lund 2005

10.2 Elektroniska Källor

Boverket. <http://www.boverket.se/> 2005-08-01.

Boverket: *Remiss: Förslag till revidering av Boverkets Byggregler avsnitt 9*. <http://www.boverket.se/novo/filelib/arkiv01/remissbbr05/remissversionavsnitt9.pdf>, 2005-04-20.

Boverket: Remiss: Förslag till revidering av Boverkets Byggregler, konsekvensbeskrivning.

<http://www.boverket.se/novo/filelib/arkiv01/remissbbr05/remissversionkonsekvensutr^{edning}bbrrevidering1267och9.pdf>, 2005-04-20

EU-upplysningen. Byggnaders energiförbrukning ska deklarerars.

http://www.eu-upplysningen.se/templates/EUU/NewsArticleTemplate_____2826.aspx. 2005-08-01

Johansson, Peter och Lundström, Mats. *Nya Byggregler*. Statens energimyndighet.

http://www.stem.se/WEB/STEMEx01Swe.nsf/F_PreGen01?ReadForm&MenuSelect=4076D1169FA608D7C1256FD30043E053&WT=Aktuellt.Energitinget.Session%2013:1%20dag%202.Nya%20byggregler, 2005-05-31

Nyman, Bengt. *Energideklarering av byggnader - för effektivare energianvändning*. Statens

Energimyndighet. [http://www.stem.se/WEB/STEMFe01.nsf/V_Media00/270B7AE63F6066E3C1256FD3004CD57D/\\$file/Bengt%20Nyman.pdf](http://www.stem.se/WEB/STEMFe01.nsf/V_Media00/270B7AE63F6066E3C1256FD3004CD57D/$file/Bengt%20Nyman.pdf). 2005-05-31.

SCB. *Energistatistik för bostadshus 2003*. Statistiska Central Byrån.

http://www.scb.se/statistik/EN/EN0101/2003A02/EN0101_2003A02_SM_EN16SM0401.pdf. 2005-06-10.

Svensk Areamätning. *Svensk Standard SS 021053*

<http://www.svenskarea.com/valdadelar.html> 2005-06-08.

10.3 Muntliga Källor

Adalberth, Karin. Ansvarig för Gumslöv. Prime Project. Personlig kommunikation. 2005-05-10.

Almgren, Anders. Skanska Teknik. Personlig kommunikation. 2005-05-20.

Bülow-Hübe, Helena. Avdelningen för Energi och Byggnadsdesign, LTH. Personlig kommunikation. 2005-05-05.

Nordquist, Birgitta. Avdelningen för Installationsteknik, LTH. Personlig kommunikation. 2005-06-08.

Warvinge, Catarina. Personlig kommunikation vt 05.

10.4 Företagsinterna källor

JM-data.

Skanska Teknik. Projektbeskrivning till ”Moderna Hus”.

Bilaga A: Matlab fil för energisimulering

MATLAB: M-file för simulering av energibehov samt beräkning av brottsannolikhet

```
Nsimul=100000;    % Antal simuleingar
NS=13;           % Antal av variabler för påfrestning

% Påfrestning
% Variabler i ordningen:
% U Ti qv ql Qtvv pdr Qfhel phhel Qhhel ptvv qsol vpump Qpump Qpers
% medelvärde:
meanS=[0.48 22.1 0.335 0.12 30 0.075 16 0.7 25 0.1 19 3 8.76];
% standardavvikelse:
stdS=[0.015 1.14 0.005 0.017 2 0.0125 1 0.05 2.3 0.017 1 0.17 0.7];
%s1=U, s2=Ti, s3=qv, s4=qL, s5=Qtvv, s6=pdr, s7=Qfhel, S8=phhel
%s9=Qhhel, s10=ptvv, s11=qsol, s12=vpump, s13=pumpeffekt, s14=Qpers

covariance_matrix=zeros(13);    % matris för covarians
for i=1:length(stdS)
    covariance_matrix(i,i)=stdS(i)^2;
end

% Korrelation
cov12=0.0;    % Korrelation mellan variable 1 och
covariance_matrix(1,2)=cov12*stdS(1)*stdS(2);
covariance_matrix(2,1)=covariance_matrix(1,2);
S=mvnrnd(meanS,covariance_matrix, Nsimul);
stdS=std(S)
varS=var(S)
covS=cov(S)
covariance_matrix
corrcoefS=corrcoef(S)

%Ekvationer för energiberäkningens delposter
%s1=U, s2=Ti, s3=qv, s4=qL, s5=Qtvv, s6=pdr, s7=Qfhel, S8=phhel
%s9=Qhhel, s10=ptvv, s11=qsol, s12=vpump, s13=pumpeffekt, s14=Qpers
St=7.73*S(:,1).*(S(:,2)-5);
Svl=10.62*(S(:,3)+S(:,4)).*(S(:,2)-5);
Stvv=S(:,5);
Sdr=S(:,6).*(0.6*St+Stvv);
Sfhel=S(:,7);
Sspill=S(:,8).*S(:,9)+S(:,10).*S(:,5);
Ssol=S(:,11);
Spump=18.8*(S(:,12)-1);
Spers=S(:,13);

Stot=St+Svl+Stvv+Sdr+Sfhel-Sspill-Ssol-Spump-Spers;

meanStot=mean(Stot)
stdStot=std(Stot)

% Bärförmåga
R=110;
```

```
meanR=mean(R)
stdR=std(R)
```

```
% Figure
figure; grid on; hold on;
yCDFStot=linspace(0,1,length(Stot));
sortStot=sort(Stot);
plot(sortStot,yCDFStot,'k--'); grid on; hold on;
```

```
%Beräkning av brottsannolikhet
pf=length(find(R<=Stot))/Nsimul
```

```
% Säkerhetsindex
beta=-norminv(pf)
```

Bilaga B: Dataunderlag

Energistatistik för bostadshus i Stockholm stad uppförda 1995-2002. Mätperiod 1 april till 30 mars. Energi för förekommande garage ingår. Area för garage ingår ej. Anslutet till Formas fjärrvärme utan värmeåtervinning.

Projekt nr	Antal Lgh	Medellgh	Uppvärmd	Förbrukn. värme och varmvatten
		area	area	
		m ²	m ²	Mwh
		BRA	BRA	
1	44	77	3 400	519,0
2	88	90	7 920	996,0
3	91	91	8 263	1 320,0
4	82	117	9 675	1 046,0
5	46	113	5 200	665,0
6	28	114	3 200	485,0
7	60	98	5 895	1 042,0
8	106	113	12 000	742,0
9	28	114	3 200	510,0
10	16	98	1 560	270,0
11	16	98	1 560	274,0
12	38	128	4 900	400,0
13	35	108	3 800	396,0
14	82	111	9 100	1 044,0
15	41	98	4 100	637,0
16	20	100	2 000	263,0
17	127	111	14 150	1 696,0
18	24	117	2 800	263,0
19	38	112	4 252	380,0
20	117	91	12 009	1 252,0
21	126	99	12 513	1 176,0
22	33	97	3 200	557,0
23	23	98	2 262	347,0
24	33	103	3 400	553,0
25	62	115	7 138	794,0
26	24	90	2 152	350,1
27	54	96	6 175	596,0
28	33	111	3 656	552,3
29	91	106	9 700	1 323,0

Bilaga

Förbrukn. värme	Förbrukn. varm- vatten	Förbrukn. värme och varmvatten	Förbrukn. fastighets- el
kWh / m ²	kWh / m ²	kWh / m ²	
BRA	BRA	BRA	Mwh
120	32	152	57,1
98	28	126	95,6
132	28	160	124,0
108	21	129	145,0
106	22	128	99,3
130	21	151	38,4
152	25	177	70,8
39	22	61	144,6
137	22	159	38,4
147	26	173	19,4
150	26	176	19,4
62	19	81	58,8
81	23	104	45,6
85	30	115	109,2
130	25	155	147,8
106	25	131	30,0
120	22	142	277,6
72	21	93	33,6
84	18	102	63,0
79	24	103	531,0
69	25	94	563,0
148	26	174	50,3
153	25	178	26,3
139	24	163	27,6
89	22	111	29,8
122	28	150	42,7
79	18	97	70,3
129	23	152	74,1
112	23	135	116,4

Hantering av variationer i energiberäkningar för bostadshus

Projekt nr	Förbrukn. fastighets- el	Förbrukn. hushålls- el	Förbrukn. fastighets- och hushållsel	Summa Energi el o. värme kWh / m ² BRA
	kWh / m ²	kWh / m ²	kWh / m ²	
	BRA	BRA	BRA	
	1	17	32	
2	12	27	39	165
3	15	26	41	201
4	15	25	40	169
5	19	22	41	169
6	12	26	38	189
7	12	31	43	220
8	12	28	40	101
9	12	22	34	193
10	12	26	38	211
11	12	26	38	214
12	12	23	35	116
13	12	25	37	141
14	12	23	35	150
15	37	25	62	217
16	15	30	45	176
17	19	22	41	183
18	12	21	33	126
19	15	33	48	150
20	15	29	44	147
21	15	30	45	139
22	16	26	42	216
23	12	25	37	215
24	8	24	32	195
25	4	26	30	141
26	20	27	47	197
27	11	19	30	127
28	20	24	44	196
29	12	23	35	170

Medel förbrukn. fastighets- el	Medel förbrukn. hushålls- el	Medel förbrukn. fastighetsel o. hushållsel	Medel summa energi el o. värme kWh / m ² BRA
kWh / m ²	kWh / m ²	kWh / m ²	kWh / m ²
BRA	BRA	BRA	BRA
14,3	257	40,0	164,2

