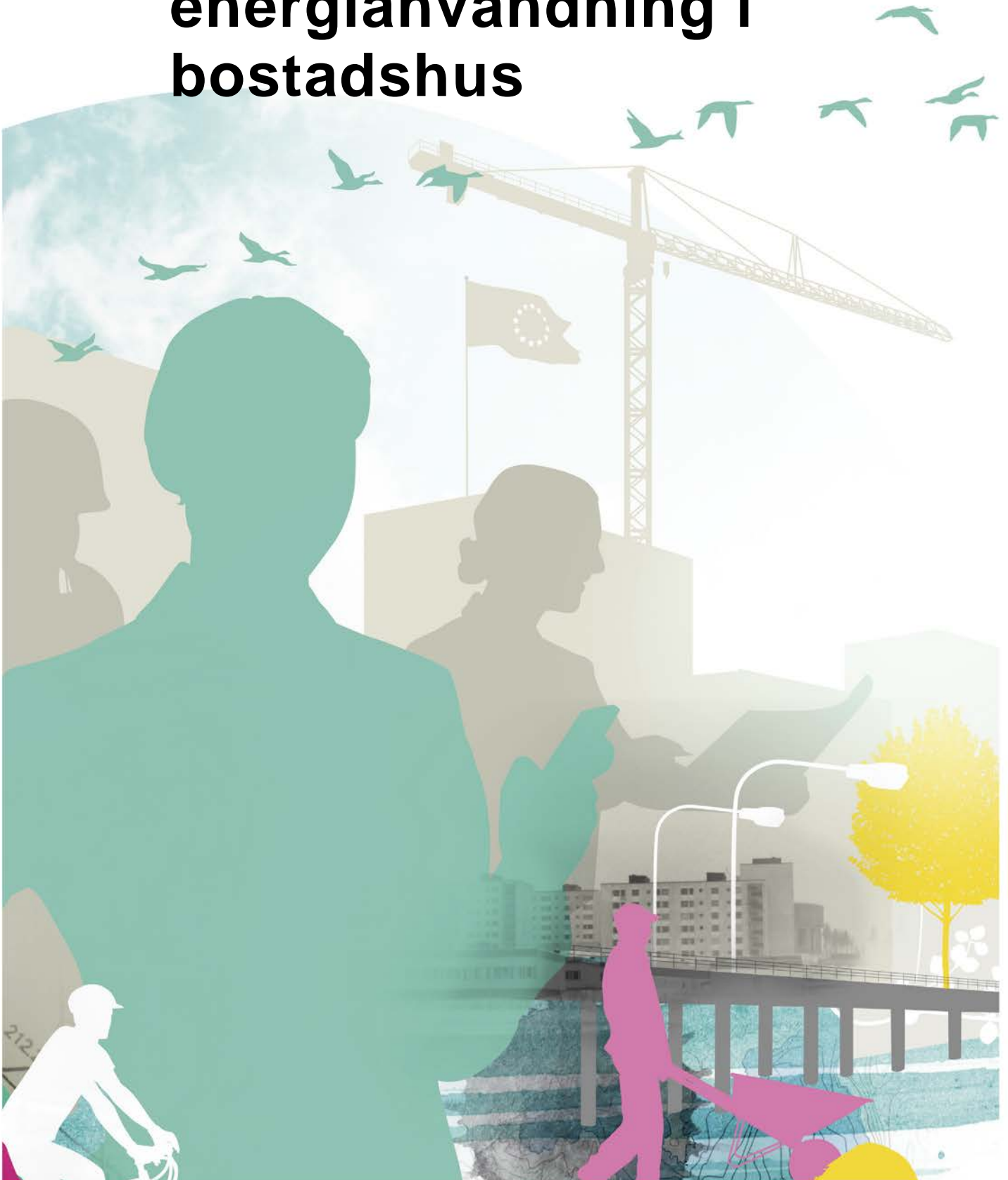




Beräkningsmetod för sannolik energianvändning i bostadshus



Beräkningsmetod för sannolik energianvändning i bostadshus

Stephen Burke, NCC

Johnny Kronvall, StruSoft

Per Sahlin, EQUA

Anders Ljungberg, NCC



Energimyndighetens projektnummer: 39706-1

E2B2



Förord

E2B2 Forskning och innovation för energieffektivt byggande och boende är ett program där akademi och näringsliv samverkar för att utveckla ny kunskap, teknik, produkter och tjänster.

I Sverige står bebyggelsen för cirka 35 procent av energianvändningen och det är en samhällsutmaning att åstadkomma verklig energieffektivisering så att vi ska kunna nå våra nationella mål inom klimat och miljö. I E2B2 bidrar vi till energieffektivisering inom byggande och boende på flera sätt. Vi säkerställer långsiktig kompetensförsörjning i form av kunniga människor. Vi bygger ny kunskap i form av nyskapande forskningsprojekt. Vi utvecklar teknik, produkter och tjänster och vi visar att de fungerar i verkligheten.

I programmet samverkar över 200 byggtreprenörer, fastighetsbolag, materialleverantörer, installationsleverantörer, energiföretag, teknik konsulter, arkitekter etcetera med akademi, institut och andra experter. Tillsammans skapar vi nytta av den kunskap som tas fram i programmet.

Beräkningsmetod för sannolik energianvändning i bostadshus är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av NCC Sverige och har genomförts i samverkan med StruSoft, EQUA Simulation AB och Lunds universitet.

Skärpta krav på byggnaders energiprestanda och krav på tidiga prognoser av byggnaders driftkostnader sätter stort fokus på energifrågan redan innan byggstart. Byggnaders energiprestanda beräknas i projekteringskedet och dessa beräkningar kan idag utgöra underlag för energigarantier. För att säkra energiprestandan görs därför ofta ett påslag på det beräknade resultatet, som en säkerhetsmarginal. Det riskerar dock att leda till dyrare byggnader. I det här projektet har forskare utvecklat statistiska metoder för säkrare riskbedömningar på energiberäkningar.

Stockholm, Datum 6 december 2017

Anne Grete Hestnes,

Ordförande i E2B2

Professor vid Tekniskt-Naturvetenskapliga Universitet i Trondheim, Norge

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att E2B2 har tagit ställning till innehållet.



Sammanfattning

Boverket publicerade under 2006 en uppdatering av Boverkets byggregler (BBR) med ett helt nytt krav på byggnaders energiprestanda. Det nya kravet på specifik energianvändning poängterade vikten av att kunna utföra energibalansberäkningar med resultat som stämmer väl med uppmätta värden i den färdiga byggnaden. Många projekt klarade inte energikravet och den uppmätta energianvändningen blev högre än både den beräknade energianvändningen och BBR:s krav på uppmätt energianvändning.

Detta projekt har som övergripande syfte att testa möjligheten att genomföra probabilistiska energibalansberäkningar, jämföra beräknad spridning mot uppmätt energianvändning i ett bostadsområde samt studera vilka indata som har största påverkan på variationen av resultat.

Resultaten från både det första provet av metoden (Småhus) och de riktiga objekten (Passivhusen) uppvisade goda resultat. De energimätningar som genomfört i 26 passivhus stämde mycket väl överens med energibalansberäkningen med Monte Carlo-metoden.

Denna studie har också visat att det krävs mycket av personen som utför energiberäkningen och denne måste förstå sina indata och den byggnad som är föremål för energibalansberäkningen. Spridningen begränsades i detta fall med flera parametrar baserade på en kombination av uppmätta data och antaganden. Trots det hade resultatet ändå en spridning från 32 till 73 kWh/m²A_{temp}, år i ett passivhus. Analysen av indata visade att brukarbeteende hade den största påverkan på energianvändning i husen, samt att till synes identiska hus kan ha en stor variation i uppmätt energianvändning.

Denna rapport är en sammanfattning av de viktigaste resultaten från projektet. För en komplett redovisning av projektet med alla indata och resultat sök på projekt nummer 13074 på www.sbuf.se.

Nyckelord: *Probabilistisk energiberäkning, Morrismetoden, Monte Carlo metoden, passivhus, energiuppföljning*



Summary

Boverket published an update of the Swedish Building Code (BBR) in 2006 with a new requirement on a building's energy performance. The requirement stressed the importance of being able to predict (through energy calculations) and verify a building's specific energy use (through measurements) before and after a building was completed. Many projects did not meet these new requirements because the measured energy use was higher than both the calculated energy use and the maximum specific energy use as defined in BBR.

The main purpose of this project was to test the concept of performing probabilistic energy calculations with dynamic calculation software. The calculated results were compared to measured energy use in a residential area and the input data was studied to see which input data had the largest influence on the specific energy use.

The results from both the initial development and testing of the method (a single-family home), and the application of the method on a real object (passive house) showed very promising results. Energy measurements from 26 passive houses correlated very well with the energy calculation results using the Monte Carlo method.

This study has also shown that this method demands more of the user, whom must understand all their input data and the object to be calculated. In this case, the spread of the input data was limited to a spread based on measured and realistic variations of specific products. Even though the variations were limited to realistic variations, the energy calculations showed a spread between 32 and 73 kWh/m²A_{temp} year for a passive house. The measured energy use was approximately the same. The analysis of the input data showed that the user behavior had the largest influence on the calculated energy use and that this variation could explain the large spread in measured energy use in identical passive houses.

This report is a summary of the most important results from the project. For a complete report (in Swedish) search for project number 13074 at www.sbuf.se. For more information in English, our article titled "Method for probabilistic energy calculations – variable parameters" as published at the Nordic Symposium in Building Physics 2017 conference proceedings will be available from www.sciencedirect.com in the future.

Keywords: *Probabilistic energy calculation, Morris method, Monte-Carlo method, passive house, energy measurements*



INNEHÅLL

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	7
2	GENOMFÖRANDE	8
2.1	INDATA	8
2.2	UTDATA	9
2.3	MONTE CARLO-SIMULERINGSTEKNIK	9
2.4	VAD ÄR SLUMPMÄSSIGT?	10
3	RESULTAT	11
3.1	PROVFALL 2 - PASSIVHUS: SPECIFIKA DATA MED MINDRE SPRIDNING	11
3.1.1	RESULTAT AV BERÄKNINGEN	FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.
4	DISKUSSION	16
5	FRAMTIDA ARBETE	17
6	PUBLIKATIONSLISTA	18
7	CITERADE ARBETEN	19
	BILAGOR	20



1 Inledning och bakgrund

Denna rapport är en sammanfattning av de viktigaste resultaten från projektet. För en komplett redovisning av projektet med all bakgrundsinformation, indata och resultat samt bilagor och framtida publikationer kopplat till projektet sök på projekt nummer 13074 på www.sbuf.se.

Byggindustrin har börjat att, i vissa projekt, applicera en så kallad energiprestandagaranti. Det innebär att byggföretagen utlovar att den specifika byggnaden kommer att prestera energimässigt på en viss nivå. Garantin innefattar oftast vite eller kompensationer. En avtalad kompensation kan, till exempel, utgöras av ersättning för de ökade energikostnader som uppkommer av att byggnaden inte möter avtalad energiprestanda. Då blir det viktigare för byggföretag att ha bra beräkningsverktyg, erfaren och skicklig personal för energisimuleringarna och verklighetstroga indata till energibalansberäkningarna.

När man ska garantera en viss prestanda, måste man hantera risken att den uppmätta prestandan överskrider den beräknade. Idag använder branschen schablonvärden som kan inhämtas från till exempel Boverkets nya föreskrift BEN eller från Svebys brukarindata, men inga indataparametrar presenteras där med någon sannolik variation. Det innebär att det är svårt att göra en riskbedömning av energianvändningen till en rimlig kostnad. Kostnaden är beroende av både tiden det tar att hitta indata samt själva beräkningstiden. En parameterstudie kan genomföras där energianvändningen i en byggnad simuleras ett antal gånger, men det finns inte mycket information att tillgå rörande hur vissa parametrar varierar eller hur stor variation som kan betraktas som normal. Resultatet blir en dyr, osäker parameterstudie, där en säkerhetsmarginal måste läggas på med en förhoppning om att den är tillräckligt väl tilltagen. Probabilistiska verktyg som utvecklas grundade på resultatet i detta projekt kommer att kunna ge mer korrekta svar på frågor om risker med olika energilösningar samt vilka parametrar som har störst påverkan på en byggnads energianvändning.

Det projekt som beskrivs här har som övergripande syfte att:

- Testa den faktiska möjligheten att genomföra probabilistiska energibalansberäkningar
- Jämföra beräknad spridning mot uppmätt energianvändning i ett bostadsområde
- Studera vilka indata som har den största påverkan på variationen av resultat
- Börja definiera en realistisk spridning av de mest signifikanta parametrarna
- Studera för- och nackdelar med probabilistiska energibalansberäkningar för bygg- och fastighetssektorn samt de möjligheter som molnbaserade beräkningsserverar medför
- Studera problematiken kring diskrepanser mellan beräknad och uppmätt energianvändning i nya byggnader genom att kvantifiera de säkerhetsmarginaler som bör tillämpas för att med olika grader av sannolikhet (t ex 99 eller 95-procentsnivå), så att den verkliga energianvändningen inte kommer att överskrida den beräknade.
- Studera tillgängliga stokastiska modeller för brukarbeteende och testa hur några av dessa kan fungera i praktisk projektering



2 Genomförande

I detta projekt har probabilistiska energibalansberäkningar genomförts för två olika objekt: ett standard-enfamiljshus (inledande testfall, i rapporten även kallat Småhus) och ett en familjs passivhus (i rapporten även kallat Passivhus). För att göra detta projekt möjligt, har två mjukvaruföretag som gör energibalansberäkningsprogram, EQUA Simulation AB och StruSoft AB, utvecklat nya modifierade versioner av sin mjukvara för energibalansberäkningar och Lunds universitet har tagit fram indatafiler innehållande slumpmässiga indataparametrar till de två beräkningsprogrammen. Programmen läser in hur många beräkningsfall som ska simuleras samt de olika indataparametrarnas värden som därefter används i energibalansberäkningarna. Det totala resultatet fås sedan ut som specifik energianvändning för de olika testfallen. Varje testfall innehåller slumpmässigt genererade värden för var och en av de olika indataparametrarna med fördelningar. (Se Bilaga 1 för indataparametrarna samt vilken spridning och spridningsform som används för varje parameter.)

Detta ger sedan en fördelning för energianvändning där hänsyn tagits till osäkerheterna i indata. Den observerade fördelningen kan sedan användas för att beräkna kvantiler och på så sätt ge en övre gräns för energianvändning med en given noggrannhet. Det finns också en osäkerhet i beräkningen som beror på att det endast är ett begränsat antal simulerade värden i beräkningarna som tillåts variera. Denna osäkerhet kan dock kvantifieras och kompenseras för genom återsamplingstekniker (s.k. bootstrap). I detta projekt har bara sexton parametrar studerats, se Bilaga 1 och Burke et al (2017).

2.1 Indata

Eftersom syftet med projektet är att utveckla en metod för energisimuleringar med hjälp av Monte Carlo-metoder är det centralt att hitta en realistisk beskrivning för indata till simuleringen. Sexton olika indataparametrar valdes ut. Dessa varierar sedan enligt realistiska fördelningar som svarar mot de som förväntas i materialegenskaper och brukarbeteende. Notera att det inte finns nog data för att kunna ge exakta fördelningar för merparten av indataparametrarna; dock är alla variationer som används grundade på källor med verkliga data. En enkel fördelning, baserad på de begränsade data som fanns tillgängliga tillsammans med den erfarenhet som projektets arbetsgrupp har, användes för att testa beräkningsmetoden. De olika fördelningarna finns beskrivna i figur 1. Vidare arbete behövs för att förbättra fördelningarna för de olika indataparametrarna.



Figur 1: Principiellt utseende för de olika fördelningstyperna för indata, a: triangulär, b: likformig och c: skev triangulär (höger respektive vänsterskev, till ex. g-värdet av fönster samt SFP av ventilationssystem).



Det är viktigt att påpeka att spridning av materialindata i detta sammanhang inte är relaterat till osäkerheter i en produktkategori (skillnaden mellan olika produkter, eller till exempel om projektet inte vet vilket U-värde fönstren i byggnaden ska ha för att byggnaden ska uppnå en viss energiprestanda). Istället är det osäkerheten i ett specifikt material eller en specifik produkt som varierar. Projektet utgår ifrån att alla produkter är kända och det är spridningen i materialegenskaper som kan förklara spridningen i uppmätt energi. Spridning i brukarrelaterade indata är baserad på hur olika personer kan använda huset på olika sätt. I denna studie, har klimatskärmens verkliga (uppmätta) lufttäthet använts. Variationen av hushållsel har också baserats på mätning i det projekt som används som jämförelse. I övrigt har litteraturstudier genomförts för att definiera olika indatas spridning.

2.2 Utdata

Monte Carlo-beräkningen producerar ett totalt utdataresultat som motsvarar 1000 enskilda energibalansberäkningar. Alla dessa utdata måste sammanställas på ett sätt så att datan kan analyseras på olika sätt. I detta projekt presenteras varje delresultat som den specifika energianvändningen för byggnaden enligt BBR:s definition med enheten $\text{kWh/m}^2 A_{\text{temp}}, \text{år}$. De olika delresultaten är kopplade till sina indata för att effekten av de olika indataspridningarna på resultaten ska kunna analyseras.

För att kunna se effekten varje parameter har på resultatet, designades de första 33 (31 för passivhuset) parametervariationerna enligt Morrismetoden (Morris, 1991). Kortfattat innebär det i denna studie att den första energibalansberäkningen simuleras med angivna originalvärden. I nästa beräkning ändras en parameter till sitt minsta värde och i beräkningen därefter till sitt maximala värde. Efter att detta är färdigt med en parameter så ändras en annan parameter till sitt minimum och sedan till sitt maximum-värde.

2.3 Monte Carlo-simuleringsteknik

Monte Carlo-metoder innebär att variabler genereras med slumpmässig variation enligt någon förutbestämd fördelning. Dessa variabler används sedan för att uppskatta någon storhet, såsom ex. energianvändning. Från resultatet, går det att uppskatta genomsnittliga värden samt även kvantiler för fördelningar t.ex. 95 procent-kvantilen för energianvändning i en specifik byggnad. Resultatet tar hänsyn till osäkerheter i diverse indataparametrar. I situationer där utdata på ett komplext sätt beror på indata är det ofta omöjligt att beskriva sambandet med en enkel matematisk ekvation. Sambandet mellan utdata i form av uppmätt och indata i form av materialegenskaper, brukarbeteende och klimatfiler är ett sådant exempel. Fördelen med Monte Carlo-metoder är att så länge det finns en beräkningsbar regel eller algoritm för att transformera indata till utdata så kan metoden användas nästan oavsett hur komplext sambandet är. Genom att variera indata beräknas motsvarande variation hos utdata. Denna uppsättning utdatapunkter (beräknad energianvändning) kan sedan användas för att beräkna exempelvis genomsnittlig energianvändning, men även ett intervall för vilken energianvändningen med t.ex. 95 % sannolikhet kommer att hålla sig inom en given osäkerhet, beskrivet som en fördelning av indata. Dock är förutsättningen för att resultatet ska bli korrekt att rimliga antaganden för osäkerheten i indata görs. Detta är väsentligt oavsett vilken metod som används för att kvantifiera spridningen i utdata och inte specifikt bara för Monte Carlo-metoden.



I praktiken kan bara ett ändligt antal simuleringar med variation av indata genomföras. Det leder till en osäkerhet i resultatet. Denna osäkerhet är dock kvantifierbar och hänsyn till detta kan tas genom att lägga till en extra marginal för energianvändningen för att vara på den säkra sidan. Det kan göras genom att vi på ett smart sätt återanvänder de redan simulerade energibalansberäkningarna, så kallad återsampling. Den extra tid detta tar är försumbar jämfört med den tid som energibalansberäkningarna tar.

2.4 Vad är slumpmässigt?

För att få en uppfattning om hur osäkerheten i energianvändning beror på osäkerheten i indataparametrarna genereras 1000 olika slumpmässiga kombinationer av värdena på de 16 indataparametrarna. För vart och ett av dessa 1000 olika fall beräknas energianvändningen på samma sätt som om parametrarna varit fixa. Det vill säga att efter beräkningen startats betraktas parametrarna som konstanta. Detta resulterar i 1000 olika värden på beräknad energianvändning som ska representera den osäkerhet som parameterosäkerheten ger upphov till. Hade vi simulerat om de 1000 olika slumpmässiga kombinationerna hade vi fått lite andra värden på den beräknade energianvändningen. Ju fler olika testfall vi genererar från början desto mindre variation mellan den ursprungliga körningen och den hypotetiska nya körningen kan vi förvänta oss. Fler testfall tar längre tid att beräkna så vi får göra en avvägning mellan noggrannhet och komplexitet av beräkningarna. Det finns dock ett sätt kvantifiera den osäkerhet som beror på att vi bara använt 1000 testfall.

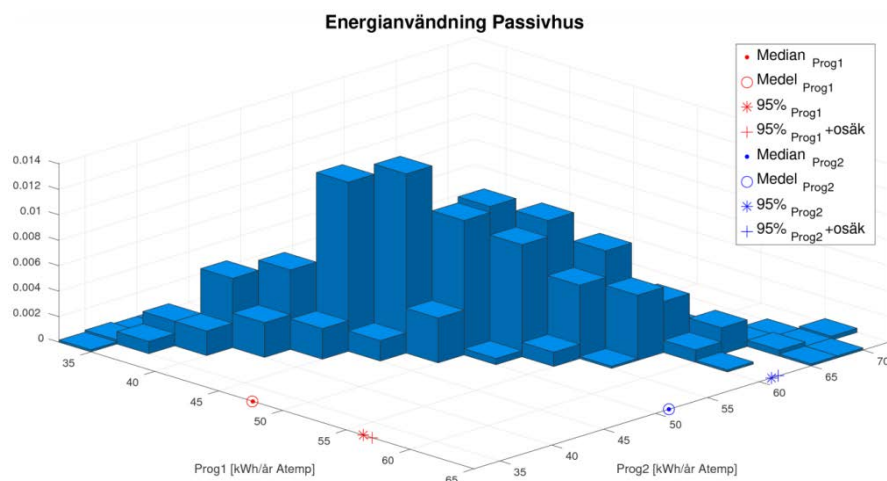
Vi kan slumpmässigt dra 1000 tal med återläggning från de ursprungliga beräknade 1000 energianvändningarna, så kallade återsampling eller bootstrap. Det lättaste sättet att visualisera detta är att tänka sig att vi skrivit ner alla värdena på 1000 olika små lappar. Dessa lappar lägger vi en stor skål och rör om. Vi tar upp en lapp på måfå, skriver ner vad som står på den. Vi lägger sedan tillbaka lappen och upprepar detta förfarande 1000 gånger. Då har vi fått en "ny" sampel. I praktiken låter vi förstas datorn göra detta. (Det finns, givet att de 1000 ursprungliga talen är olika, om vi inte bryr oss om ordningen på de 1000 talen ungefär 10 600 olika resultat vi kan få av denna återsampling, 10001000 om vi bryr oss om ordningen). Med dessa återanvända värden kan vi åter igen räkna ut medelvärde, median och andra saker vi är intresserade av, men utan att behöva köra energibalansberäkningsprogrammen igen. Upprepar vi denna återsamlingsprocedur på datorn ett stort antal gånger, säg 10 000 gånger, får vi en god uppfattning om osäkerheten i medelvärde, median och andra saker vi kan vara intresserade av. I det här exemplet då vi genom återsampling plockar fram 1000*10 000 tal d.v.s. totalt 10 miljoner värden tar det på en normal persondator i storleksordningen 1–2 sekunder vilket är helt försumbart jämfört mot den tid som återgår för att genomföra de 1000 energibalansberäkningarna.



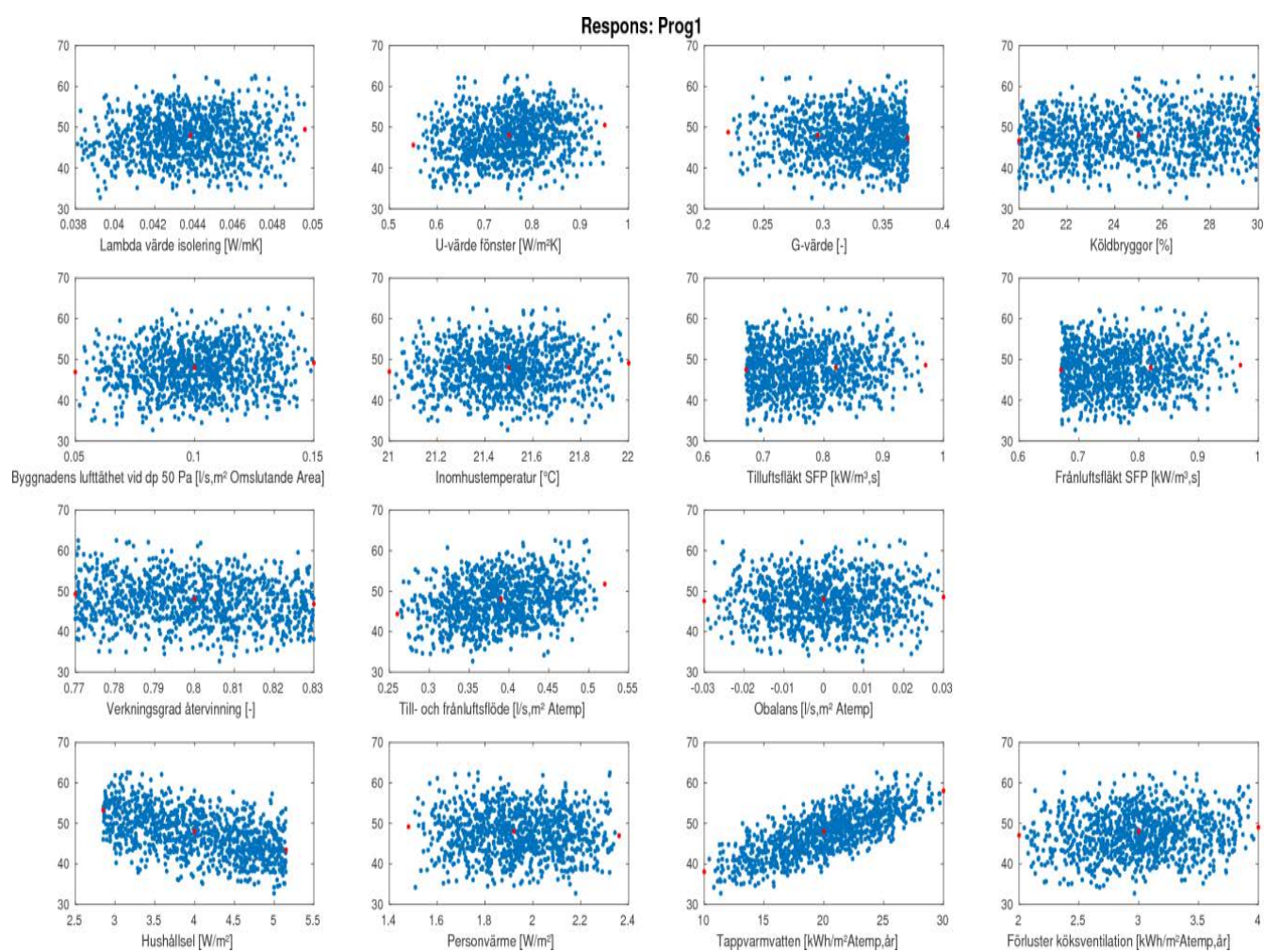
3 Resultat

3.1 Provfall 2 - passivhus: resultat av beräkningen

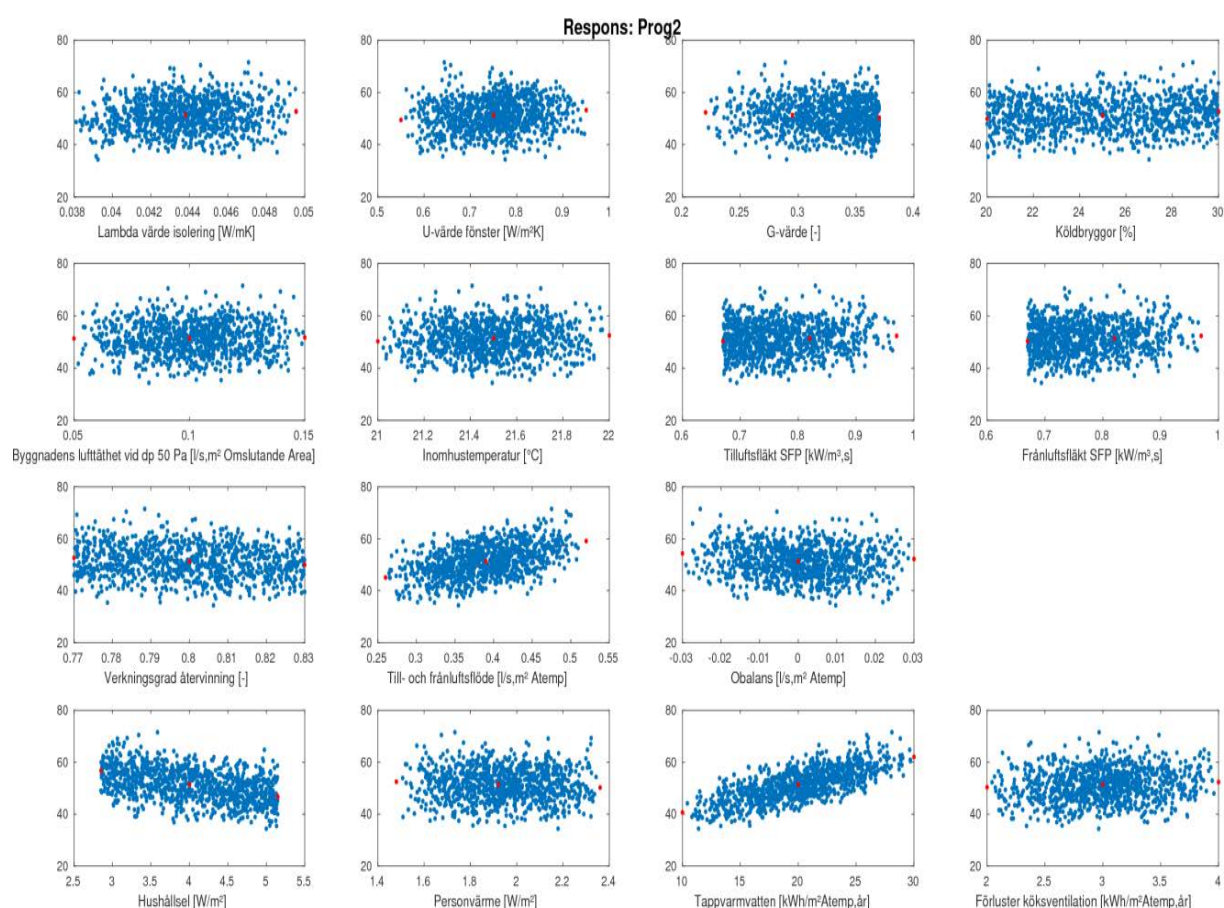
Resultaten för den beräknad energianvändning i passivhusfallet visas i figur 2. Här presenteras medelvärde och median för energianvändningen samt en nivå som energianvändningen med 95 % sannolikhet inte överskrider. Vi anger också en korrektion till denna nivå med hjälp av återsamplingstekniker, där vi tar hänsyn till den osäkerhet som beror på att vi bara använt ett begränsat antal slumpmässiga indatavärden, här 1000 stycken. Passivhuset är till stora delar likt det första småhusfallet men med bättre energiegenskaper. Vi ser att den genomsnittliga skillnaden i beräknad energianvändning skiljer sig med ca 12.5 kWh/m² år till passivhusets fördel. Även för detta fall ses en skillnad mellan de två programmen på ca 3 kWh/m² år. För att få en uppfattning om de olika indataparametrarnas inverkan på beräknad energianvändning plottar vi i figur 3 och figur 4 denna som funktion av de olika indataparametrarna. Märk dock att för de blå punkterna så ändras alla inparametrar samtidigt och de röda punkterna svarar mot att endast den angivna parametern tillåts ändras och hålla allt annat oförändrat. Den tomma platsen i figurerna svarar mot VVC-förluster som inte finns med i passivhuset.



Figur 2: Tvådimensionellt histogram över beräknad energianvändning för Passivhuset. På koordinataxlarna finns medelvärde, median och kvantiler markerade för respektive beräkningsprogram. Y-axeln är dimensionslös och visar den andel resultat från programmen. Summan av alla andelar är 1.



Figur 3: Respons mot indata för passivhuset med beräkningsprogram 1 i läsordning Lambda, U-värde, g-värde, köldbryggor, luftläckage, inomhustemp, tilluftsfläkt, frånluftsfläkt, verkningsgrad återvinning, tilluftsflöde, flödesobalans, hushållsel, personvärme, tappvarmvatten, och köksventilation.



Figur 4: Respons mot underliggande för passivhuset med beräkningsprogram 2 i läsortning Lambda, U-värde, g-värde, köldbryggor, luftläckage, inomhustemp, tilluftsfläkt, frånluftsfläkt, verkningsgrad återvinning, tilluftsflöde, flödesobalans, hushållsel, personvärme, TVV, och köksventilation.

Resultatet i figur 3 och 4 visar hur mycket varje parameter påverkar resultatet. De röda punkter visar resultatet när man tillämpade Morris metoden på indata (d.v.s. att parametern variera en och en). Då kan man se, i detta fall, att vissa parametrar påverka energiberäkning väldigt lite som byggnadens lufttäthet. Dessutom har de blåa punkter en platt trend som tyder på en svag påverkan på alla energiberäkningar. Tappvarmvatten, däremot, har både en stor spridning mellan Morris metoden och en tydlig trend uppåt. Det innebär att den parametern har en stor påverkan på energianvändning i detta fall. Hushållsel har en negativ trend på energianvändning vilket är logiskt då det blir en "gratis" energi som reducerar uppvärmningsbehov då BBR inte tar hänsyn till hushållsenergi.

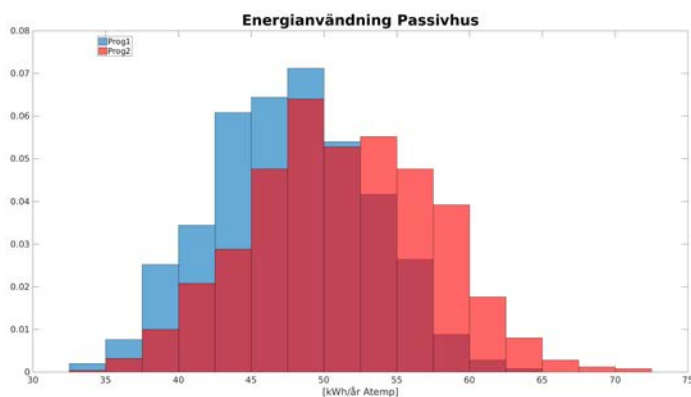
I Tabell 1 visas inverkan på beräknad energianvändning. De olika programmen har olika inverkan från sina indata vilket är förväntat då de olika programmen räknar på lite olika sätt. En intressant punkt är att obalans påverkar på olika sätt. Den påverkan som obalansen har är dock liten i båda beräkningsprogrammen.



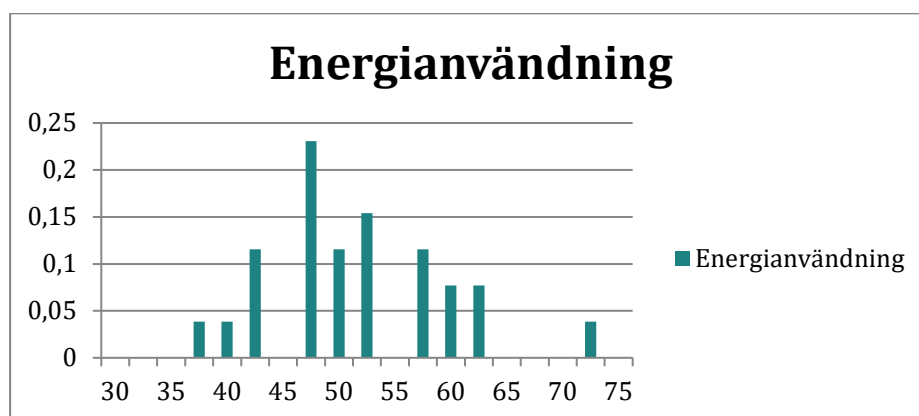
Tabell 1: Inverkan från indata på energianvändning i passivhuset. Enheten är dimensionslös och visar den andel påverkan i programmen relativ till varann (totalpåverkan är 1, och en negativ innebär en energitillförsel).

Parameter	PROG1	PROG2
TVV	0.74	0.69
Hushållsel	-0.52	-0.46
Tillluftsflöde	0.26	0.44
U-värde fönster	0.17	0.11
Köldbryggor	0.15	0.13
VVX (ventilationsåtervinning)	-0.12	-0.12
Lambda värde isolering	0.11	0.10
Personvärme	-0.08	-0.08
Byggnadens luftläckning	0.08	0.01
Inomhustemperatur	0.08	0.07
Kökets ventilationsförluster	0.08	0.07
G-värde	-0.06	-0.07
Tillluftsfläkt SFP	0.05	0.07
Frånluftsfläkt SFP	0.05	0.07
Obalans (frånluftflöde)	0.03	-0.08

Beräkningsresultatet från både programmen syns i figur 5 för passivhuset. Programmen visar bra överensstämmelse i denna energibalansberäkning.



Figur 5: Beräkningsresultat från båda programmen. Y-axeln är dimensionslös och visar den andel resultat från programmen.



Figur 6: Distribution av uppmätt energianvändning. Y-axeln är dimensionslös och visar den andel resultat från programmen.

Figur 6 visar den uppmätta energianvändningen i 26 passivhus byggda enligt underlaget för Provfall 2. Uppmätt energianvändning stämmer väl överens med beräkningsresultat i figur 5. De flesta byggnaderna hade en uppmätt specifik energianvändning på ca 47–50 kWh/m²A_{temp}, år. Lägsta uppmätta värde var ca 38 kWh/m²A_{temp}, år och ett högsta uppmätta värde var ca 75 kWh/m²A_{temp}, år. NCC:s originalberäkning från då byggnaderna uppfördes hade ett resultat på 60 kWh/m²A_{temp}, år. Detta innebär att det, redan från början, fanns en liten risk att den faktiska energianvändningen skulle var högre än originalberäkningen.

För att läsa en mer omfattande rapport om metoden samt alla resultat som har erhållits i projektet, går in på www.sbuf.se och sök på projekt # 13074.



4 Diskussion

Under arbetet har prototypversioner av beräkningsverktygen utvecklats. Dessa är inte tillgängliga för kunder. Båda programtillverkarna avser dock att införa flera av de utvecklade funktionerna i framtida kommersiellt tillgängliga versioner.

Resultaten från både det första provet av metoden (Småhus) samt ett riktigt objekt (Passivhusen) uppvisade goda resultat. De energimätningar som genomfördes i de 26 passivhusen stämde mycket väl överens med energibalansberäkningen med Monte Carlo-metoden.

Denna studie har också visat att mycket krävs av personen som gör energiberäkningarna och denne måste förstå sina indata och den byggnad som är föremål för energibalansberäkningen. Spridningen begränsades i detta fall med flera parametrar baserade på uppmätt data. Trots det hade resultatet ändå en spridning från 32 till 73 kWh/m²A_{temp}, år i ett passivhus. Analysen av indata visade att brukarbeteende hade den största påverkan på energianvändning i husen, samt att till synes identiska hus kan ha en stor variation i uppmätt energianvändning.

En slutsats är att beräknad energianvändning som redovisas i decimalform inte bör accepteras. Enligt resultatet i detta arbete bör energibalansberäkningen snarare ringa in en storleksordning angivet med en precision av tioalet kWh/m²A_{temp}, år.

Det kan inte heller i förlängningen betraktas som optimalt att anta en godtycklig säkerhetsmarginal med förhoppning om att den är tillräckligt högt ansatt för att den uppmätta energianvändningen inte hamnar över den nivån och samtidigt så pass låg att beräkningen överensstämmer med mätresultatet. Om den uppmätta energianvändningen är mycket lägre än den beräknade har byggnaden troligtvis kostat mer än den hade behövt göra.

Studien visar att det är möjligt att få fram ett probabilistiskt resultat som kan användas som diskussionsunderlag i en dialog där möjliga variationer och acceptabla risker vid en uppföljning genom mätning kan diskuteras. Detta kan minska risken för meningsskiljaktigheter och krav på eventuella åtgärder i ett senare skede och spara tid, pengar och resurser för både byggherre och entreprenör i ett byggprojekt.



5 Framtida arbete

Metoden har visat på en stor potential gällande riskbedömning med energibalansberäkningar. Bara 16 parametrar har varierats i denna studie och en hel del arbete återstår för att förbättra metoden. Resultatet av denna studie visar att mer möda behöver läggas på att säkra goda indata med korrekta spridningsmöjligheter och inte bara medelvärden. Inga av de indata som använts i projektet byggde på ett säkerställt underlag avseende spridning. Dessutom bör data fragment klassificeras i olika grupper, såsom byggnad, brukarbeteende, klimat, reglersystem o.s.v.

Vidare behövs riskbedömningsverktyg utvecklas för att underlätta analys av utdata och på så sätt översätta utdata från metoden till operativa slutsatser såsom acceptabla risknivåer och optimala val i övrigt.

Metoden behöver också testas på mer avancerade byggnadsmodeller som flerbostadshus eller kontorshus för att bedöma hur programmen hanterar uppskalningseffekter med fler parametrar och med mer komplicerade indata.

En studie behövs för att ta fram olika variationer av klimat. Möjligen är det bäst att testa metoden på historiska klimat innan försök med spekulativt valda framtidsklimat inleds.

Ett simuleringsverktyg på probabilistisk bas kan troligtvis även användas som energioptimeringsverktyg, som enkelt kan underlätta studier av inverkan på energianvändningen av kombinationer av indatavärden med spridningar.



6 Publikationslista

Burke, S., Kronvall, J., Wiktorsson, M., & Sahlin, P., (2017), *Method for probabilistic energy calculations – variable parameters*, 11th Nordic Symposium on Building Physics 11-14 June, 2017, Trondheim, Norway

Burke, S., Kronvall, J., Wiktorsson, M., & Sahlin, P., Ljungberg, A., (2017), *Beräkningsmetod för sannolik energianvändning i bostadshus*, SBUF Projekt 13074



7 Citerade arbeten

Burke, S., Kronvall, J., Wiktorsson, M., & Sahlin, P., Ljungberg, A., (2017), *Beräkningsmetod för sannolik energianvändning i bostadshus*, SBUF Projekt 13074

Filipsson, P., & Dalenbäck, J.-O. (2014). *Energiberäkningar - Avvikelse mellan projekterat och uppmätt energibehov - Förstudie (Energy calculations - Differences between calculated and measured energy demand - A prestudy, in Swedish)*. Göteborg: Department of Building Services, Chalmers.

Levander, T., & Stengård, L. (2009). *Mätning av kall- och varmvattenanvändning i 44 hushåll*. Eskilstuna: Statens energimyndighet.

Morris, M. (May 1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2).

Sveby. (2012). *Brukarindata bostäder*. Stockholm: Svebyprogrammet.



Bilagor

Bilaga 1 – Faktorinventering för provfallet 2 – Passivhus.

Parameter	Symbol	Enhet	Originalvärde	Variation	Distribution	Källa
Lambdavärdet hos mineralull	λ	W/mK	0,0438	$\pm 0,00575$	Triangulär	Boverket (marknadskontroll)
U-värde hos fönster	U-värde	W/m ² K	0,75	$\pm 0,2$	Triangulär	Boverket (marknadskontroll)
g-värde hos fönster	g	-	0,37	-0,15	Skev triangulär vänster	Antagande NCC
Köldbryggor	Ψ	% of U*A	25	± 5	Likformig	Beräknat (NCC)
Byggnadens luftläckning	q_{50}	l/sm ² External surface area @ 50 Pa	0,1	$\pm 0,05$	Triangulär	NCC uppmätt
Inomhustemperatur	T	°C	21,5	$\pm 0,5$	Triangulär	NCC uppmätt
Tilluftsfläkt Specific Fan Power (SFP)	SFP _{Sup}	kW/m ³ s	0,67	+0,30	Skev triangulär höger	Produktblad + antagande
Frånluftsfläkt SFP	SFP _{Ext}	kW/m ³ s	0,67	+0,30	Skev triangulär höger	Produktblad + antagande
VVX (ventilationsåtervinning)	η	-	0,8	$\pm 0,03$	Likformig	Produktblad + antagande
Tilluftsflöde	q_{Sup}	l/sm ² A _{temp}	0,39	$\pm 0,13$	Triangulär	(Filipsson & Dalenbäck, 2014)
Obalans (frånluftsflöde)	q_{Ext}	l/sm ² A _{temp}	$q_{Ext} = q_{sup} - \text{variation}$	$\pm 0,03$	Triangulär	BBR21 avsnitt 6:251 samt antagande
VVC	Q_{VVC}	W/m ² A _{temp}	0	± 0	Likformig	Ingen installerade
Hushållsel	Q_{house}	W/m ² A _{temp}	4	$\pm 1,15$	Likformig	NCC uppmätt
Personvärme	Q_{pers}	W/m ² A _{temp}	1,92	$\pm 0,44$	Triangulär	(Sveby, 2012)
TVV	E_{DHW}	kWh/m ² A _{temp} yr	20	± 10	Triangulär	(Levander & Stengård, 2009)
Kökets ventilationsförluster	E_{KV}	kWh/m ² A _{temp} yr	3	± 1	Triangulär	(Sveby, 2012), antagande



Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

E2B2 genomförs i samverkan mellan IQ Samhällsbyggnad och Energimyndigheten åren 2013–2017. Läs mer på www.E2B2.se.

