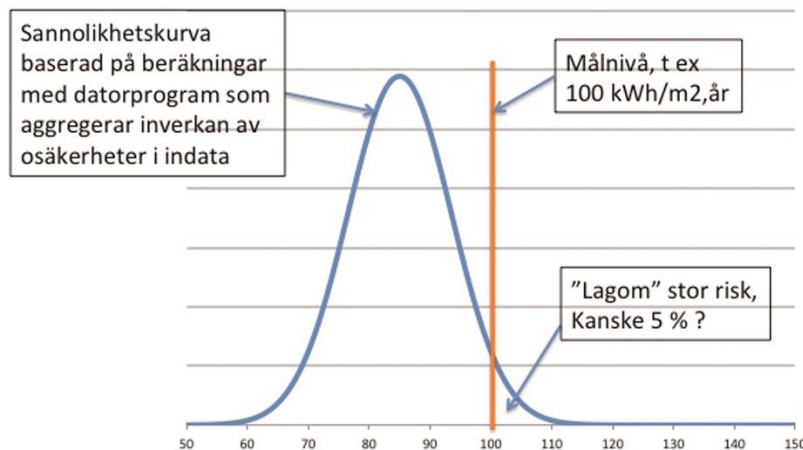


BERÄKNINGSMETOD FÖR SANNOLIK ENERGIANVÄNDNING I BOSTADSHUS



Stephen Burke, NCC, Johnny Kronvall, StruSoft, Magnus Wiktorsson, LTH, Per Sahlin, EQUA, Anders Ljungberg, NCC

2017-07-09

FÖRORD

Projektgruppen vill tacka huvudfinansiärer av projektet:

- Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, (SBUF) och
- E2B2 – ett samverkansprogram mellan Energimyndigheten och IQ Samhällsbyggnad.

Övriga finansiärer av projektet som har bidragit med sin tid är NCC Sverige AB, StruSoft AB, EQUA Simulation AB, WSP, FOJAB, Chalmers Fastighets AB, PEAB, LTH, Skanska och Boverket.

Författarna vill tacka alla personer i arbetsgruppen som har bidragit med sin kunskap och tid:

- Anders Rosenqvist, StruSoft
- Andreas Rudenå, StruSoft
- Anders Ljungberg, NCC
- Christopher Bengtsson, NCC
- Diverse personer på EQUA.

Författarna vill även tacka referensgruppen som har bidragit med sin kunskap och förslag på genomförande av projektet:

- Åke Blomsterberg, WSP
- Helena Bulöw-Hube, FOJAB
- Bengt Bergsten, Chalmers Fastighets AB
- Nils Rydén, PEAB
- Hans Bagge, LTH
- Björn Berggren, Skanska
- Björn Mattsson/Robert Johannesson/Lin Liljefors, Boverket

Stephen, Johnny, Magnus och Per
Malmö 2017-07-09

SAMMANFATTNING

Den 21 juni 2006 publicerade Boverket en uppdatering av Boverkets byggregler (BBR) med ett helt nytt krav på byggnaders energiprestanda som fortfarande är aktuellt. 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 av energikravet och den uppmätta energianvändningen blev högre än både den beräknade energianvändningen och BBR:s krav på uppmätt energianvändning. Diskussionen om säkerhetsmarginaler började i samband med detta och sedan dess har flera projekt behandlat denna fråga och försökt svara på hur stor säkerhetsmarginal som bör användas.

Kostnaden för produktionen påverkas av valet av säkerhetsmarginal. Om en stor säkerhetsmarginal väljs kan det t.ex. leda till en mer välisolerad klimatskärm som kan öka produktionskostnader på flera sätt. Detta dels direkt genom att mer material måste köpas in och dels indirekt genom att tjockare ytterväggar både kan minska uthyrningsbar yta och påverka tillgänglighetsanpassning med risk för ytterligare kostnadsökningar. Byggkostnaden är kraftigt beroende av det indata och den säkerhetsmarginal som väljs. Om brukarindata används på ett felaktigt sätt och en otillräcklig säkerhetsmarginal appliceras riskerar byggnaden att visa upp ett onödigt stort energibehov i driftfasen vilket också är kostnadsdrivande. Den beräkning som genomförs ger idag ingen indikation kopplat till dessa risker.

Almeida & Ramos (2014) undersökte om Monte Carlo-simuleringar kunde appliceras på indata till energibalansberäkningar och konstaterade att det går att göra med en programmeringsinsats. I arbetet noterades att energianvändning kan variera kraftigt genom en variation av enbart fem indataparametrar. Det innebär att nästa steg för att få bättre energibalansberäkningar är att implementera dessa beräkningar med hänsyn tagen till att indata och beräknad energi bör betraktas som stokastiska variabler.

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

I detta projekt har probabilistiska energibalansberäkningar genomförts för två olika objekt: ett standard-enfamiljshus (inledande testfall, i rapporten även kallat Småhus) och ett enfamiljs 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 indatafilmer 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.

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 mycket krävs av energiberäknaren och denne måste förstå sin indata och den byggnad som är föremål för energibalansberäkningen. Spridningen begränsades i detta fall med flera parametrar baserade på en kombination av uppmätt data och antagande. Trots det hade resultatet ändå en spridning från 32 till 73 kWh/m²Atemp, 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.

INNEHÅLL

INTRODUKTION	5
BAKGRUND	5
<i>Svenska byggregler kopplade till byggnaders energiprestanda</i>	5
PROBABILISTISKA METODER - TIDIGARE FORSKNING	7
SYFTE	9
PROJEKTETS RELEVANS FÖR BYGG- OCH FASTIGHETSBRANSCHEN	9
AVGRÄNSNINGAR	10
METODEN	10
DAGENS BERÄKNINGSSÄTT	10
<i>Indata</i>	10
<i>Utdata</i>	11
NYTT BERÄKNINGSSÄTT	11
<i>Indata</i>	11
<i>Utdata</i>	12
MONTE CARLO-SIMULERINGSTEKNIK	12
<i>Vad är Slumpmässigt?</i>	13
RESULTAT OCH ANALYS	14
FAKTORINVENTERING	14
BERÄKNINGSRESULTAT OCH ANALYS.....	17
<i>Provfall 1 - Småhus: allmänna data stor spridning</i>	17
Indata	17
Resultat av beräkningen.....	17
Analys av resultatet: Provfall 1 - Småhus	20
<i>Provfall 2 - Passivhus: specifika data med mindre spridning</i>	20

Indata	20
Resultat av beräkningen.....	20
Analys av resultatet: Provfall 2 - Passivhus.....	23
MODELLER FÖR BRUKANDE	24
SLUTSATSER.....	24
FRAMTIDA ARBETE	25
CITERADE ARBETEN	26

INTRODUKTION

Bakgrund

Svenska byggregler kopplade till byggnaders energiprestanda

Den 21 juni 2006 publicerade Boverket en uppdatering av Boverkets byggregler (BBR) med ett helt nytt krav på byggnaders energiprestanda som gäller än idag. Avsnitt 9 i BBR hade då omarbetats så att föreskrifterna inte bara kom att ställa krav som i huvudsak inriktade sig mot klimatskärmen. Kraven hade också formulerats så att den energi som, vid normalt brukande, under ett normalår behöver levereras till en byggnad för uppvärmning, kyla, tappvarmvatten samt drift av byggnadens installationer och övrig fastighetsel måste begränsas. Den tillförda energin, ofta benämnd köpt energi, skulle enligt kraven summeras och divideras med A_{temp} . A_{temp} är arean av samtliga våningsplan för temperaturreglerade utrymmen, avsedda att värmas till mer än 10 °C, som begränsas av klimatskärmens insida. Denna energianvändning kom att kallas byggnadens specifika energianvändning.

Ett allmänt råd gav att byggnadens specifika energianvändning borde verifieras både genom en energibalansberäkning och genom mätning i den färdiga byggnaden (BBR12, BFS 2006:12¹), något som gäller än idag.

Kravet på specifik energianvändning ringade in vikten av att kunna utföra energibalansberäkningar med resultat som stämmer väl med uppmätta värden i den färdiga byggnaden. Mot bakgrund av detta har ett flertal studier genomförts där överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt energianvändning analyserats: (Bagge, Elmroth, & Lindstrij, 2004) (Filipsson & Dalenbäck, 2014) (Irminger-Street, 2008) (Kurkinen, Filipsson, Elfborg, & Ruud, 2014) (Nilsson, 2003) (Wellholm, 2012).

Under de år som följde efter det att BBR började kräva att energibalansberäkningar ska genomföras hade byggindustrin svårigheter med implementering av både energibalansberäkningar och uppföljning av energianvändning i byggnader. Många projekt klarade inte av energikravet och den uppmätta energianvändningen blev högre än både den beräknade energianvändningen och BBR:s krav på uppmätt energianvändning.

En tidig jämförelse mellan beräknad och uppmätt energianvändning gjordes av Annika Nilsson (nu Annika Matsson) på Bo01-området i Malmö, ett område som var ungefär fem år gammalt då BBR-ändringen infördes (Nilsson, 2003). Arbetet visade att branschen inte var redo att hantera de nya presterandebaserade byggkraven. Bo01-området hade ett specifikt energikrav på 105 kWh/m²A_{temp}, år för alla hus som skulle byggas i området. Huvudorsaken var att hela området skulle försörjas med el från ett vindkraftverk och en lokal biovärmeanläggning, och för att vara självförsörjande med el och värme krävdes det att alla byggnader var energisnåla. Inget av de 10 analyserade objekten uppfyllde kraven på energianvändning. De flesta objekt visade mellan 40 och 60 % högre uppmätt energianvändning än beräknat (Nilsson, 2003, s. 55). Det värsta fallet hade en uppmätt energianvändning som var ca 300 % högre än vad som beräknats.

En viktig erfarenhet av Nilsson (2003, s. 115) var att verklighetsförankrad indata saknades. När Bo01 projekterades och uppfördes saknades det mycket information om kopplingen mellan beräknad och uppmätt energianvändning. Studien identifierade flera indataparametrar som hade

¹ <https://rinfo.boverket.se/BBR/PDF/BFS2006-12BBR12.pdf>

hanterats fel i energibalansberäkningen. Dessa inkluderade solstrålning, köldbryggor, inomhustemperaturer, samt hur byggnaden skulle bli energieffektiv genom att alla delar hanteras som ett system och inte flera oberoende. (Nilsson, 2003)

För att börja hantera indataparametrarna i energibalansberäkningar på ett mer verklighetsförankrat sätt startades 2007 ett projekt kallat Sveby – Standardisera och verifiera energiprestanda i byggnader - med målet att ”ta fram hjälpmedel för att förtydliga och säkerställa hela processen från programkrav till verifierat resultat” (Sveby, 2012, s. 2). Sveby startades med finansiering från Energimyndigheten och inom projektet påbörjades arbetet med att ta framförslag på indata för olika typer av byggnader och se över hur verifiering av byggnaders energianvändning ska gå till.

Sveby har genomfört två energibalansberäkningstävlingar hittills: en för ett flerbostadshus och en där en skolbyggnads energianvändning skulle beräknas.

Objekten i tävlingarna har varit verkliga byggnader där både indata till energibalansberäkningar och mätdata dokumenterats. Trots tillgång till samma underlag och indata, varierade resultaten av energibalansberäkningarna stort, i den första tävlingen skiljde sig det största och minsta resultatet åt med 61 % (Sveby, 2012, s. 3). En viktig slutsats från den första energibalansberäkningstävlingen var att variationen berodde på individerna som utfört energibalansberäkningarna och inte på vilket verktyg de använt. En andra viktig slutsats var att Sveby rekommenderade att en säkerhetsmarginal på 10 % bör användas på en energibalansberäkning för att ta hänsyn till olika variationer i resultat (Sveby, 2012, s. 32). Genom en andra energibalansberäkningstävling som genomfördes 2016 kunde Sveby konstatera att variationen i resultaten var i storleksordningen densamma som i den första tävlingen, men att avvikelserna ökar procentuellt sett beroende på att energianvändningen på skolbyggnaden är hälften mot flerbostadshuset. (Sveby, 2016, s. 3)

Lämplig storleksordning på säkerhetsmarginal är en sedan länge omtvistad fråga. Diskussionen om säkerhetsmarginaler började i samband med de uppdaterade byggreglerna som kom ut 2006. Sedan dess har flera projekt behandlat denna fråga och försökt svara på hur stor säkerhetsmarginal som bör användas. Utöver arbetet som gjordes av Sveby har studier som Berggren (2013) fokuserat på en parameter i taget, såsom till exempel köldbryggor, medan andra har försökt att skapa en helhetsbild. I SBUF-projektet ”Lämpliga säkerhetsmarginaler i energiberäkningar – säkerhetsmarginaler för osäkerheter i indata” (Jansson, 2017) har en parameterstudie genomförts där flera energibalansberäkningar med varierande indata analyserats för att bedöma behovet av säkerhetsmarginal.

En viktig avgränsning i Janssons projekt är definitionen av spridning. Spridningen i indata gäller bara osäkerheten kring val av material och inte variationer i materialegenskaper. Ett exempel är fönster med U-värde $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ där det faktiska U-värdet kan variera beroende på fönsterdimensionen (Jansson 2013, s 14). Något som inte tas upp är att olika fönster med samma dimensioner och samma angivna U-värde ändå kan ha en variation i uppmätt U-värde. (Boverket, 2017)

Det är kanske inte så konstigt att branschen inte har kommit fram till en konkret säkerhetsmarginal, beaktat att det är två storheter av väsentligt olika karaktär som ska jämföras:

1. En beräknad energianvändning, baserad på ett stort antal, mer eller mindre välgrundade, antaganden rörande såväl om teknisk prestanda som användning

av byggnaden. Faktorer som sedan ligger till grund för en beräkningssimulering med någon mjukvara ämnad för energibalansberäkningar.

2. Mätresultat avseende verklig energianvändning i den färdiga byggnaden i bruk där resultatet inte bara återspeglar avvikelser från antagna förhållanden när det gäller byggnads- och installationsteknik och teknisk drift, utan också rör hur brukarna använder byggnaden och de tekniska installationerna i den. Även praktiska svårigheter kring mätningen spelar in, eftersom det i praktiken ofta är svårt att särskilja olika typer av levererad energi från varandra.

Med vokabulär från den matematiska statistiken kan den beräknade och den uppmätta energianvändningen betraktas som så kallade stokastiska variabler som i sin tur är beroende av ett antal underliggande stokastiska variabler. Dessa underliggande stokastiska variabler används för att beskriva den naturliga variation som finns hos olika byggnader, dess brukare och deras preferenser samt inverkan av yttre faktorer, etc. Detta förhållande öppnar för en statistisk behandling av det mångfacetterade problem som rör skillnader mellan beräknad och uppmätt energianvändning.

Att skillnaderna kan vara stora har uppmärksammats av många inom bygg- och fastighetssektorn och alltså omvittnats i åtskilliga forsknings- och utredningsarbeten, och inte minst i genomförda byggprojekt.

I vissa byggnadsobjekt har det gått att, åtminstone delvis, spåra orsakerna till diskrepanserna (Nilsson, 2003), medan orsakerna i de flesta fall endera inte har publicerats eller inte har blivit utredda.

Inom närliggande bygganknutna vetenskaper såsom konstruktionsteknik och fuktmeکانik är probabilistiska metoder numera etablerade, i första hand inom konstruktionstekniken. De grova och materialslösande dimensioneringstekniker som byggde på säkerhetsfaktorer (typ 2-, eller 3-faldig säkerhet) ersattes redan under 1980-talet med en dimensioneringsmetod som bygger på probabilistisk teori – den så kallade partialkoefficientmetoden. Också inom fuktmeکانiken och byggnadsfysiken i stort har probabilistiska metoder kommit till användning mer och mer under de senaste tjugo åren.

Dagens byggregler anger i allmänt råd att den specifika energianvändningen i alla nybyggnader bör följas upp genom mätning inom 24 månader från det att byggnaden tagits i bruk. För att minska diskrepansen mellan beräknad och uppmätt energianvändning är det viktigt att använda metoder och verktyg som beaktar variationer i parametrar som påverkar energiprestandan. Rätt hanterat ökar möjligheten att få relevanta indikationer på huruvida vissa lösningar har en acceptabel risknivå eller inte. Med dagens energibalansberäkningsverktyg och beräkningsmetoder är det svårt att bedöma storleksordningar på risker och säkerhetsmarginaler får ansättas mer eller mindre godtyckligt.

Probabilistiska metoder - Tidigare forskning

De första spåren av intresse för probabilistiska metoder gällande simulering av energianvändning i byggnader kan ses under tidigt 1990-tal (Jiang & Hong, 1993). I Norden genomfördes exempelvis ett ambitiöst doktorandarbete av Trine Dyrstad Pettersen vid NTNU i Trondheim och Högskolan i Narvik, som resulterade i doktorsavhandlingen ”Uncertainty analyses of energy consumption in dwellings” (Dyrstad Pettersen, 1997). Författaren kommer fram till att brukarna genom varierande beteenden kan anses påverka energianvändningen med ca 70 %, diskrepanser

mellan projekterade och i praktiken utförda konstruktioner anges till 20–25 % och variationer i uteklimatet som inte kompenseras för med vanliga graddagsmetoder anges till ca 5 %.

En tidigare studie om osäkerhet i beräkning av energianvändning gjordes av Jensen (2008). Här antas att osäkerheten i de ingående variablerna och i den beräknade energianvändningen är normalfördelade. Dessa antagande är i sig inte oproblematiska och borde ha verifierats mot verkliga data och beräkningar. Även om osäkerheten i indata skulle kunna approximeras av normalfördelningar med rimlig noggrannhet följer härav inte att den beräknade energin blir normalfördelad. Detta beror på att en del av de ingående variablerna kommer in på ett olinjärt sätt i energibalansberäkningen. Normalfördelningen bevaras endast av linjära transformationer. Det skulle dock kunna vara så att den beräknade energin kan approximeras med viss noggrannhet av en normalfördelning. För att avgöra om så är fallet skulle det krävas en utförligare analys. De flesta aspekterna av denna analys och kontrollen av fördelningen av indata saknas helt eller delvis i Jensen (2008). Det finns således ett tydligt behov av ytterligare studier kring probabilistiska metoder för analys av energianvändning, där realistiska fördelningar för indata och beräknad energi används.

Sveby publicerade en rapport 2013, ”Normalisering av byggnadens energianvändning – sammanfattad version” som handlar om osäkerhet i energibalansberäkningar baserat på valet av klimatfil och normalårskorrigeringen. Resultaten i denna studie var att det finns en stor osäkerhet i hela energibalansberäkningen och att brist råder på lämpliga väderfiler. Slutsatsen var här att det finns mycket arbete kvarstår, detta inkluderar arbete som behandlar säkerhetsmarginaler och arbete som kopplar ihop beräkningar och mätningar.

I Janssen (2013) ges en generell beskrivning av Monte-Carlo-baserad osäkerhetsanalys och (Van Gelder, Janssen, & Roels, 2014) behandlar probabilistisk design och analys av byggnaders tekniska funktion. (Lee & et al., 2014) behandlar de möjligheter som probabilistisk riskanalys kan innebära för Energy Performance Contracting-projekt.

Almeida & Ramos (2014) undersökte om Monte Carlo-simuleringar kunde appliceras på indata till energibalansberäkningar och konstaterade att det går att göra med genom en programmeringsinsats. I arbetet noterades att energianvändning kan variera från 49 till 156 kWh/m²·år genom en variation av enbart fem indataparametrar. Det innebär att nästa steg för att få bättre energibalansberäkningar är att implementera dessa beräkningar med hänsyn tagen till att indata och beräknad energi bör betraktas som stokastiska variabler. Det blir här också viktigt att göra en distinktion mellan att beräkna genomsnittlig energianvändning för en byggnad av en viss typ under ett genomsnittligt år och att beräkna energianvändningen för en specifik byggnad av en viss typ ett specifikt år. Variationen i energianvändning av det andra slaget är större än den av första slaget. Varje uppmätt faktisk energianvändning är i princip av det andra slaget. Det är också intressant att försöka konstruera ett intervall som med en bestämd sannolikhet täcker in uppmätt energianvändning för en specifik byggnad ett specifikt år. Vi vill således kunna utröna vad som är en normal variation i faktisk energianvändning. Detta är viktigt för att snabbt kunna konstatera om en byggnad har en onormalt hög energianvändning. Detta så att det, på ett tidigt stadium, går att undersöka vad denna eventuellt förhöjda energianvändning kan bero på.

Brukarnas beteenden är, som redan berörts, av stor betydelse för faktiskt energianvändning. Brukarbeteende kan delas in i tre kategorier: närvaro, direkt energianvändning (varmvatten, el, vedeldning), och energipåverkande beteende (val av driftinställningar, t.ex. gällande innetemperatur, vädring). Ett flertal stokastiska modeller för brukarbeteende har dokumenterats i litteraturen, bl.a. har stokastisk närvaro tidigt modellerats av Page (2007). Parallellt med vårt

arbete inom detta projekt, har ett internationellt forskarsamarbete med totalt 57 deltagande organisationer bedrivits med specifik inriktning på brukarbeteende (IEA-EBC Annex 66).

Syfte

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 beräkningsservrar medför
- Studera problematiken kring diskrepanser mellan beräknad och uppmätt energianvändning i nybyggnader 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

Projektets relevans för bygg- och fastighetsbranschen

Projektresultatet bjuder en stor och relevant nytta, såväl för bygg- och fastighetsbranschen som för samhället i stort. Detta genom att resultatet kan resultera i en förbättring av beräkningsmetoder och/eller förbättrade säkerhetsmarginaler sett ur ett statistiskt perspektiv. Möjligheten finns att optimera användandet av byggnadsmaterial med reducerad miljöpåverkan som utkomst.

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 verklighetstrogen indata till energibalansberäkningarna.

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 tiden det tar att hitta indata samt själva beräkningstiden. En parameterstudie kan genomföras där energianvändningen i en byggnad simuleras, 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.

Kostnaden för produktionen påverkas också av valet av säkerhetsmarginal. Om en stor säkerhetsmarginal väljs kan det leda till t.ex. en mer välisolerad klimatskärm som kan öka produktionskostnader på flera sätt. Detta dels direkt genom att mer material måste köpas in och

dels indirekt genom att tjockare ytterväggar både kan minska uthyrningsbar yta och påverka tillgänglighetsanpassning med risk för ytterligare kostnadsökningar. Byggekostnaden är alltså kraftigt avhängig av det indata och den säkerhetsmarginal som väljs. Om brukarindata används på ett felaktigt sätt och en otillräcklig säkerhetsmarginal appliceras riskerar å andra sidan byggnaden visa upp ett onödigt stort energibehov i driftfasen vilket också är kostnadsdrivande. Den beräkning som genomförs ger idag ingen indikation kopplat till dessa risker.

Även beställarsidan, fastighetsägare av olika slag och storlek, är betjänta av att kunna kvantifiera risken med energibalansberäkningar som inte stämmer överens med verklig energianvändning eftersom lönsamheten kan påverkas negativt av så kallade glädjekalkyler. Dålig kunskap om risker med energibalansberäkningar och dess koppling till byggnaders faktiska energiprestanda för till följd att incitamenten att förhålla sig korrekt till byggnaders energiprestanda i t. ex anbud minskar. Verktyg som utvecklas grundat på resultatet i detta projekt kommer att kunna ge mer korrekta svar på frågan om risker med olika energilösningar samt på frågor rörande vilka parametrar som har störst påverkan på en byggnads energianvändning.

Avgränsningar

Denna studie bygger på flera viktiga avgränsningar:

1. Alla energibalansberäkningar gjordes med prototypversioner av simuleringsprogram från EQUA och StruSoft. Dessa versioner har inte varit fullt ut kvalitetskontrollerade.
2. Ingen anpassning av indata gjordes i programmen för att harmonisera resultaten mellan beräkningsprogrammen med mätresultat. Modellerna byggdes i enlighet med NCC:s praxis, med en zon i ett av programmen och med en finare zonindelning i det andra.
3. SBUF krävde att projektet räknade på ett verkligt objekt med mätdata för att kunna utvärdera metoden mot verkligheten.
4. Energibalansberäkningar har genomförts av ett enfamiljshus. Det går inte att dra direkta slutsatser kring huruvida variationer ser annorlunda ut i andra typer av byggnader såsom t.ex. flerbostadshus. Det kan inte ses som osannolikt att brukarnas olika vanor i ett flerbostadshus kan leda till utjämnings effekter med en lägre variation som följd.
5. Det är ett begränsat antal indataparametrar som beaktats i detta arbete. För flera av parametrarna har en spridning i variationen antagits. Det är heller inte klarlagt hur parametrarna kan variera inom sitt spridningsområde, här finns en förbättringspotential som kräver ytterligare arbetsinsatser.
6. Många parametrar som har en påverkan på en byggnads energiprestanda är inte med i detta projekt. Också här krävs ytterligare arbete för att bättre ringa in variation och behov av säkerhetsmarginaler.

METODEN

Dagens beräkningsätt

Indata

Dagens energibalansberäkningar bygger på en stationär eller en dynamisk energibalansberäkning som är utförd med fix indata. I Sverige baseras den oftast på flera olika källor. För brukarrelaterad indata rekommenderas Boverkets eller Svebys indata för den

aktuella byggnadstypen (bostäder, kontor, skolor med flera) om inte mer projektunik indata finns att tillgå. Noteras bör här att Boverket idag ställer krav på att viss brukarindata används. I många fall har dock byggherren ett projektspecifikt och högre krav på en byggnads energianvändning. I det fallet står det byggherren fritt att ange vilken indata som ska användas för kontroll av byggnadens energiprestanda i en energibalansberäkning.

Materialdata kommer oftast från leverantörer och driftdata från beställaren eller erfarenhet från liknande projekt.

Utdata

Dagens beräkningssätt resulterar i ett beräkningsresultat. Om en kontroll ska göras av hur olika parametrar påverkar resultatet måste en parameterstudie på det aktuella objektet genomföras. Det innebär att en mängd olika energibalansberäkningar med olika indata genomförs och de olika resultaten samlas in och jämförs manuellt. Parameterstudier genomförs sällan av bygg- eller VVS-konsulter på grund av tidsbrist och begränsad budget för uppdraget. Istället är det vanligaste förfaringssättet att lägga på en säkerhetsmarginal på slutresultatet för att försöka täcka in alla osäkerheter i projektet.

Nytt beräkningssätt

I detta projekt har probabilistiska energibalansberäkningar genomförts för två olika objekt: ett standard-enfamiljshus (inledande testfall, i rapporten även kallat Småhus) och ett enfamiljs 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 enligt Figur 1 och Tabell 1 nedan. 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 tillåtit variera. Denna osäkerhet kan dock kvantifieras och kompenseras för genom återsamplingstekniker (s.k. bootstrap). I detta projekt bara ett antal osäkerheter har studeras.

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 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).

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.

Utdata

Monte Carlo-beräkningen producerar ett totalt utdataresultat som motsvarar 1000 enskilda energibalansberäkningar. All 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 $\text{kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$, 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 Morris metoden (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 då ändras en annan parameter till sitt minimum och sedan till sitt maximum-värde.

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. Det går att uppskatta genomsnittliga värden men även kvantiler för fördelningar t.ex. 95 % -kvantilen för energianvändning i en specifik byggnad där hänsyn tas 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 givet en 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.

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 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 ett ”nytt” sampel. I praktiken låter vi 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, 1000^{1000} 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 10000 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 $1000 \cdot 10000$ 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.

RESULTAT OCH ANALYS

Faktorinventering

I denna studie har vi försökt att ta hänsyn till faktorer som påverkar energianvändningen i en byggnad. Exempel på detta är värmekonduktiviteten hos den värmeisolering som avses användas eller ett U-värde hos ett specifikt fönster. En enkät, se bilaga 1, skickades ut till personer som genomför energibalansberäkningar. Syftet med enkäten var att få feedback från industrin om vilket indataparametrar de tyckte var svåra att bedöma, vilken inverkan de tyckte att de olika parametrarna har på energianvändningen och om det saknades indataparameter i enkäten.

Vi erhöll 51 svar på enkäten. Tabell 1 visar ett av resultaten från enkäten där energiexperter svarade på hur de bedömde storleken på de olika faktorernas påverkan på beräknad energianvändning. Tabellen visar också vilka faktorer som är med i denna studie (grönt) och vilka faktorer är inte med (rött).

Då studien inte har som mål att jämföra beräkningsresultat mellan olika energibalansberäkningsprogram och uppmätt energianvändning har de två mjukvaror som använts i studien anonymiserats i resultatpresentationen. Dessa kallas istället program 1 och program 2.

Tabell 1 Resultat av faktorinventering enkät.

Faktorinventering - energibalansberäkning av nybyggt flerbostadshus (Röd färg = Inte med i denna studie, Grön färg = Med i denna studie)	Energiexperters bedömning av inverkan av parametern på beräknad energianvändning (1= Mycket Stor, 5= Mycket liten)
Verkningsgrad Återvinning ventilation	1,6
A_{temp}	1,7
U-värde ($W/m^2, K$)	1,7
Inomhustemperatur	1,7
Klimatfil	1,9
λ -värde (W/mK)	1,9
Tilluftsflöde	1,9
Frånluftsflöde	1,9
Tappvarmvatten	1,9
U-värde hos prefab-element	2
Köldbryggor	2
Solskydd	2,3
G-värde (%)	2,4
Tilluftsfläkt SFP	2,4
Frånluftsfläkt SFP	2,4
Tilluftstemperatur	2,4
VVC-förluster	2,4
Verkningsgrad värmeproduktion	2,4
Hushållsel inklusive drifttid	2,4
Vädring inklusive drifttid	2,5
Avfrostning av ventilationsaggregat	2,6

Personvärme inklusive drifttid	2,6
Utformning av entré	2,7
Inomhusbelysning	2,7
Rörförluster värmesystem	2,7
Kulvertförluster	2,7
Modell för värmeutbyte mellan byggnad och mark	2,8
Avfuktning i kylbatterier	2,8
Byggfukt	2,9
Reglerförluster värmesystem	2,9
Förluster köksventilation inklusive drifttid	2,9
Öppningsfrekvens av ytterdörrar	2,9
Värmemotstånd mot ouppvärmade utrymmen	3
Val av inre och yttre värmeövergångsmotstånd	3
Hiss	3,2
ST-värde (%)	3,3
Pumpar	3,3
Markreflektion	3,8
Ljustransmission - T_{vis} (%)	3,8
Byggnadens lufttäthet	-

Baserat på enkätresultaten blev de faktorer vi beslöt ta med i detta projektbegränsade till 16 stycken (15 i fallet med passivhusberäkningen där inte varmvattencirkulation ingår som en parameter). De faktorer på listan som är placerade långt upp på listan och är rödmarkerade har uteslutits av olika orsaker. Syftet med detta arbete är, som nämnts tidigare, att utveckla och testa en ny metod. Att variera t.ex. klimatfiler med en ny metod skulle kräva mycket tid. Istället lades fokus på 16 faktorer som var högt upp på listan och som lätt kunde simuleras i både programmen. Vissa faktorer är inte aktuella i ett småhus (såsom hiss och avfuktning i kylbatteri) varför dessa uteslöts direkt.

De 16 faktorerna med dess spridningar och originalvärdet i NCC:s energibalansberäkning finns i Tabell 2. Vid passivhusfallet utgick varmvattencirkulation (VVC)-förlusterna då det varmvattnet värms upp med hjälp av genomströmningsberedare vilka värmer upp tappvarmvattnet lokalt och vid behov.

Tabell 2: Faktorinventering för provfallet 1- Småhus.

Parameter	Symbol	Enhet	Original värde	Variation	Distribution	Källa
Lambdavärde hos mineralull	λ	W/mK	0,038	$\pm 0,006$	Triangulär	Boverket (marknadskontroll)
U-värde hos fönster	U-värde	W/m ² K	0,9	$\pm 0,2$	Triangulär	Boverket (marknadskontroll)
g-värde hos fönster	g	-	0,4	-0,2	Skev triangulär vänster	Elitefönster
Köldbryggor	Ψ	% of U*A	25	± 10	Likformig	(Boverket, 2012)
Byggnadens luftläckning	q_{50}	l/sm ² External surface area @ 50 Pa	0,3	$\pm 0,2$	Triangulär	(Filipsson & Dalenbäck, 2014)
Inomhustemperatur	T	°C	21	$\pm 0,5$	Triangulär	NCC (uppmätt)
Tilluftsläkt Specific Fan Power (SFP)	SFP _{sup}	kW/m ³ s	0,75	+0,30	Skev triangulär höger	(Wahlström, Bergqvist, &

Frånluftsfläkt SFP	SFP_{Ext}	kW/m^3s	0,75	+0,30	Skev triangulär höger	Wikensten, 2015) (Wahlström, Bergqvist, & Wikensten, 2015)
VVX (ventilationsåtervinning)	η	-	0,8	$\pm 0,03$	Likformig	(Wahlström, Bergqvist, & Wikensten, 2015)
Tilluftsflöde	q_{Sup}	$l/sm^2 A_{temp}$	0,35	$\pm 0,13$	Triangulär	(Filipsson & Dalenbäck, 2014)
Obalans (frånluftsflöde)	q_{Ext}	$l/sm^2 A_{temp}$	$q_{Ext} = q_{sup} -$ variation	$\pm 0,03$	Triangulär	BBR21 avsnitt 6:251 samt antagande
VVC	Q_{VVC}	$W/m^2 A_{temp}$	1,72	$\pm 1,59$	Likformig	(BeBo, 2015)
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

För småhuset är variationen allmän. Det innebär att variationen är stor då vi inte vet exakt vilket material som kom att användas i det verkliga projektet. För passivhusberäkningen (se faktorinventering i Tabell 3) vet vi vilket material man ska använda och vissa parametrar är kända så variationen är baserad på specifika materialdata och mätdata.

Tabell 3: 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^2K	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 $U \cdot A$	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	$^{\circ}C$	21,5	$\pm 0,5$	Triangulär	NCC uppmätt
Tilluftsfläkt Specific Fan Power (SFP)	SFP_{Sup}	kW/m^3s	0,67	+0,30	Skev triangulär höger	Produktblad + antagande
Frånluftsfläkt SFP	SFP_{Ext}	kW/m^3s	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}	$l/sm^2 A_{temp}$	$q_{Ext} = q_{sup} -$ 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)

Beräkningsresultat och Analys

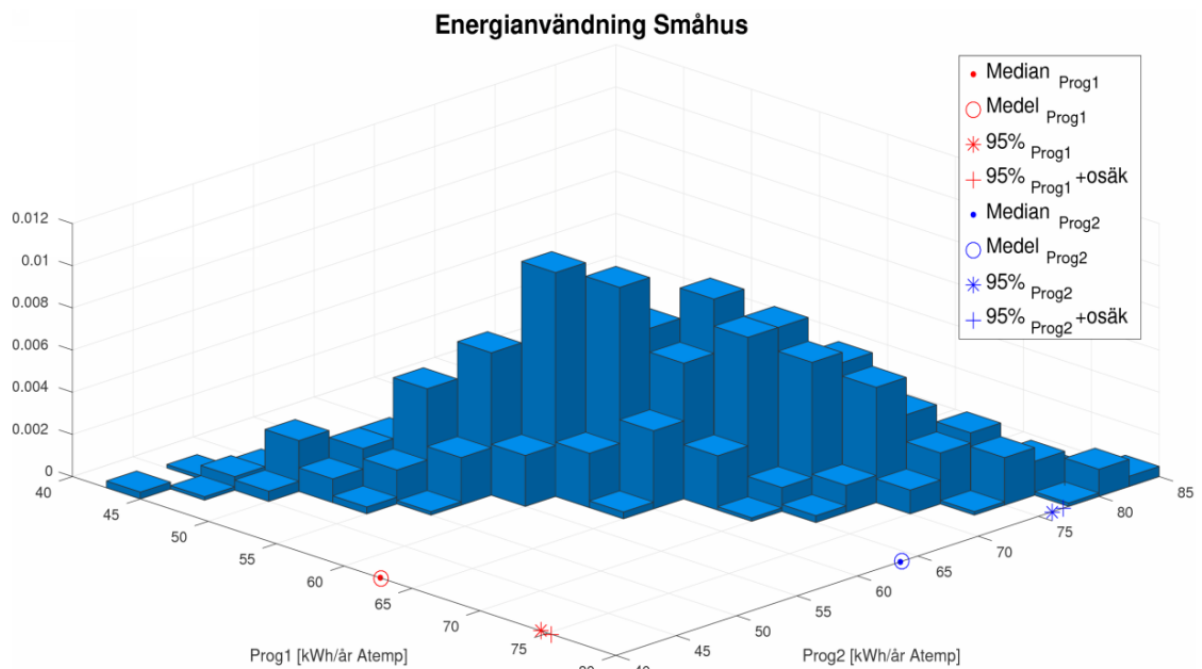
Provfall 1 - Småhus: allmänna data stor spridning

Indata

Se Tabell 2 för de aktuella indata till beräkningen.

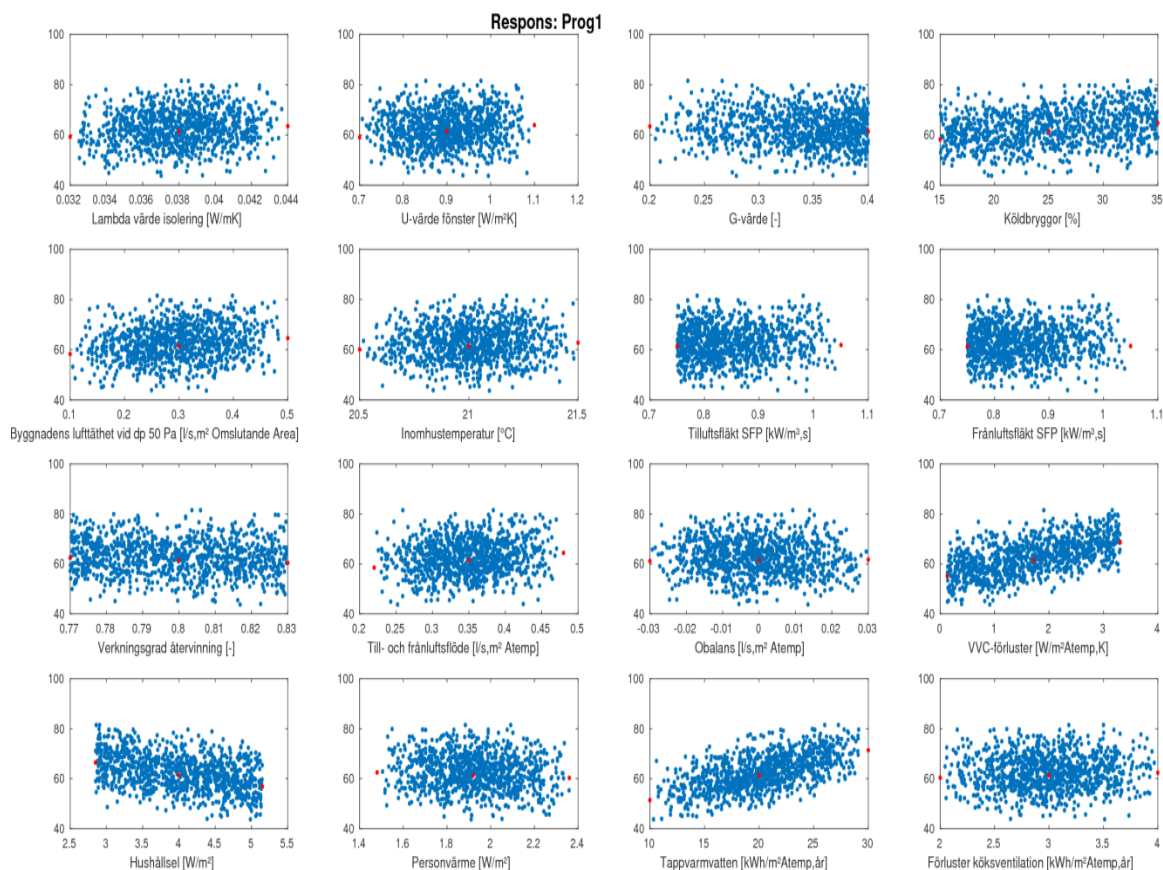
Resultat av beräkningen

De preliminära resultaten för beräknad energianvändning visas i Figur 2. Vi ger här medelvärde och median för energianvändningen samt en nivå (en så kallad kvantil) 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. Boverkets krav var att byggnadens specifika energianvändning inte skulle uppgå till mer än $110 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$, år. De ursprungliga energibalansberäkningarna indikerar ett värde på $70 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$, år. Av figuren framgår att de två beräkningsprogrammen inte ger exakt samma beräknade energianvändning. Genomsnittlig energianvändning skiljer sig åt med ca $3 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$, år. Ungefär samma skillnad finns för 95 % nivån både med och utan sampelosäkerhet.

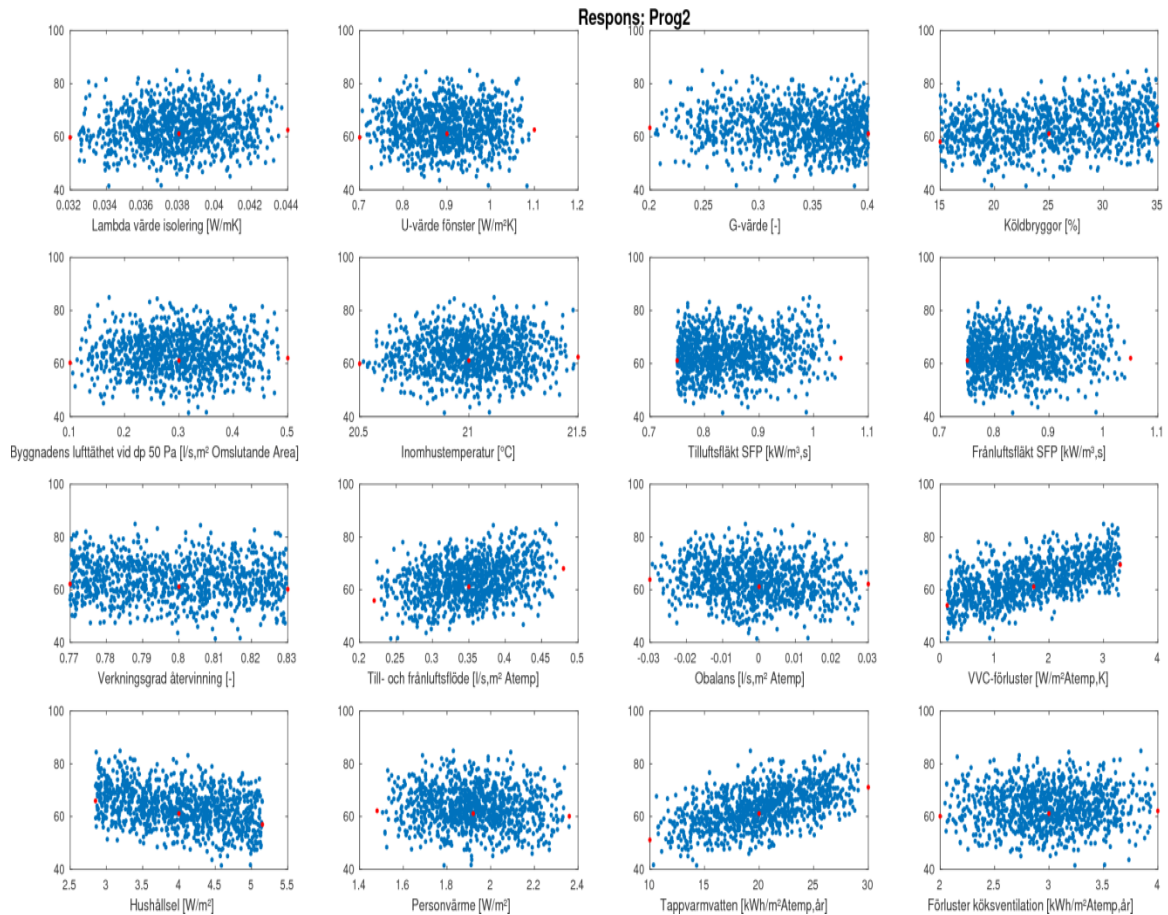


Figur 2: Tvådimensionellt histogram över energianvändning för småhuset beräknat med PROG1 och IDA. På koordinataxlarna finns medelvärde, median och kvantiler markerade för respektive beräkningsprogram.

För att få en uppfattning om de olika indataparametrarnas inverkan på beräknad energianvändning plottas, i Figur 3 och Figur 4, energianvändningen som funktion av de olika indataparametrarna. Notera att för de blå punkterna ändras alla indataparametrar samtidigt medan de röda punkterna svarar mot att endast den betraktade parametern ändras och alla andra parametrar hålls fixa enligt Morris metoden.



Figur 3 Respons som funktion av indata för program 1 i läsortning Lambda, U-värde, g-värde, köldbryggor, luftläckage, inomhustemp, Tilluftsfläkt frånluftsfläkt, verkningsgrad återvinning, tilluftsflöde, flödesobalans, VVC, hushållsel, personvärme, TVV, köksventilation.



Figur 4 Respos som funktion av indata för program 2 i läsordning Lambda, U-värde, g-värde, köldbryggor, luftläckage, inomhustemp, Tilluftsfläkt frånluftsfläkt, verkningsgrad återvinning, tilluftsflöde, flödesobalans, VVC, hushållsel, personvärme, TVV, köksventilation.

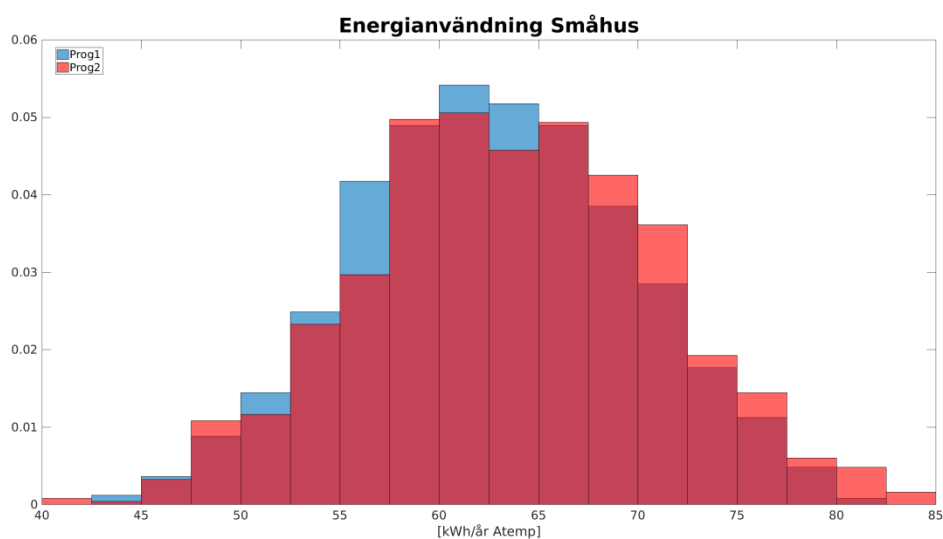
I Tabell 4 ges inverkan av indata där koefficienterna är normerade så att deras kvadratsumma är ett för att kunna jämföra storleken på inverkan mellan de olika indataparametrarna. Parametrarna är sorterade efter storleksordning med avseende på deras inverkan på beräknad energianvändning för *program 1*.

Tabell 4: Inverkan från indataparametrar på energianvändning i småhuset.

Parameter	PROG1	PROG2
TVV	0.59	0.55
VVC	0.57	0.56
Hushållsel	-0.37	-0.36
Köldbryggor	0.25	0.24
Byggnadens luftläckning	0.17	0.04
Tilluftsflöde	0.16	0.34
U-värde fönster	0.13	0.09
Lambda värde isolering	0.11	0.08
Personvärme	-0.09	-0.05
VVX (ventilationsåtervinning)	-0.08	-0.08
Inomhustemperatur	0.06	0.07
Kökets ventilationsförluster	0.05	0.06
G-värde	-0.05	-0.07
Tilluftsfläkt SFP	0.02	0.05
Frånluftsfläkt SFP	0.02	0.05
Obalans (frånluftflöde)	0.02	-0.05

Analys av resultatet: Provfall 1 - Småhus

Syftet med provfall 1 var att testa beräkningsmodellen och säkerställa att programmen räknade rätt med de olika indata samt att trenden med indataspridning hade en korrekt påverkan på resultaten. De första resultaten visade att de båda prototyp-programmen hade en del brister i både beräkningsresultat och hantering av indata. Under arbetets gång har både programmen och indata modifierats och felsökts. Det sista resultat från provfall 1, som syns i Figur 5, blev godkänd av arbetsgruppen och har resulterat i den metod och verktyg som har använts för provfall 2 – en beräkning av ett passivhus och med jämförelse med uppmätt energianvändning.



Figur 5: Resultatet av energibalansberäkningar av småhuset.

Provfall 2 - Passivhus: specifika data med mindre spridning

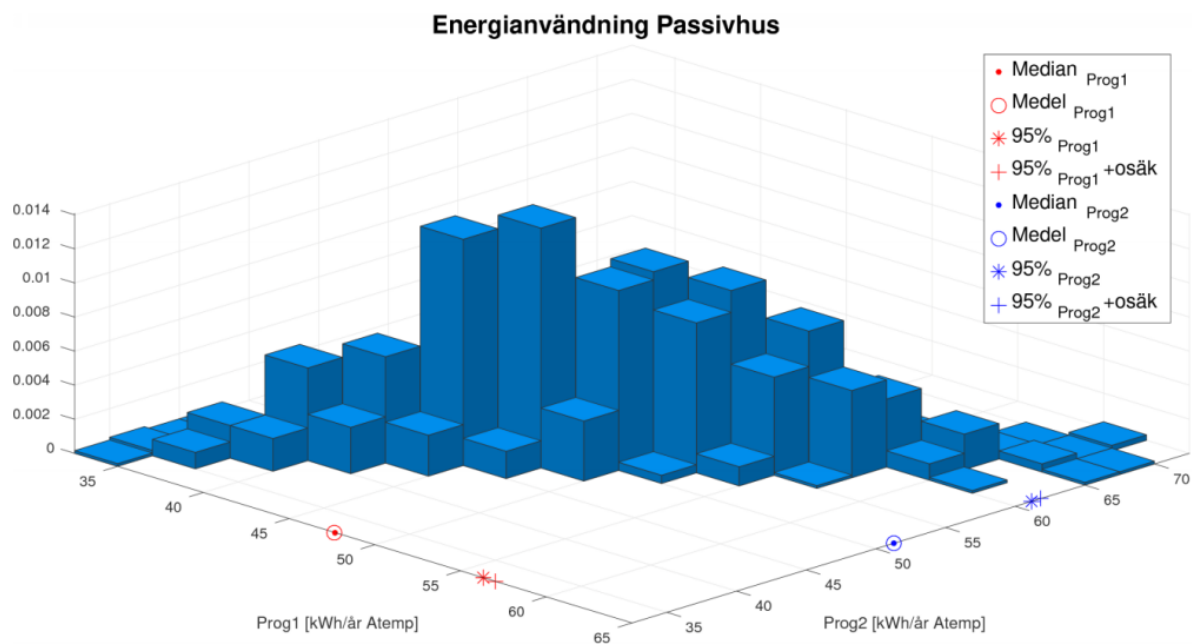
Indata

Se Tabell 3 för aktuella indata till passivhusberäkningen.

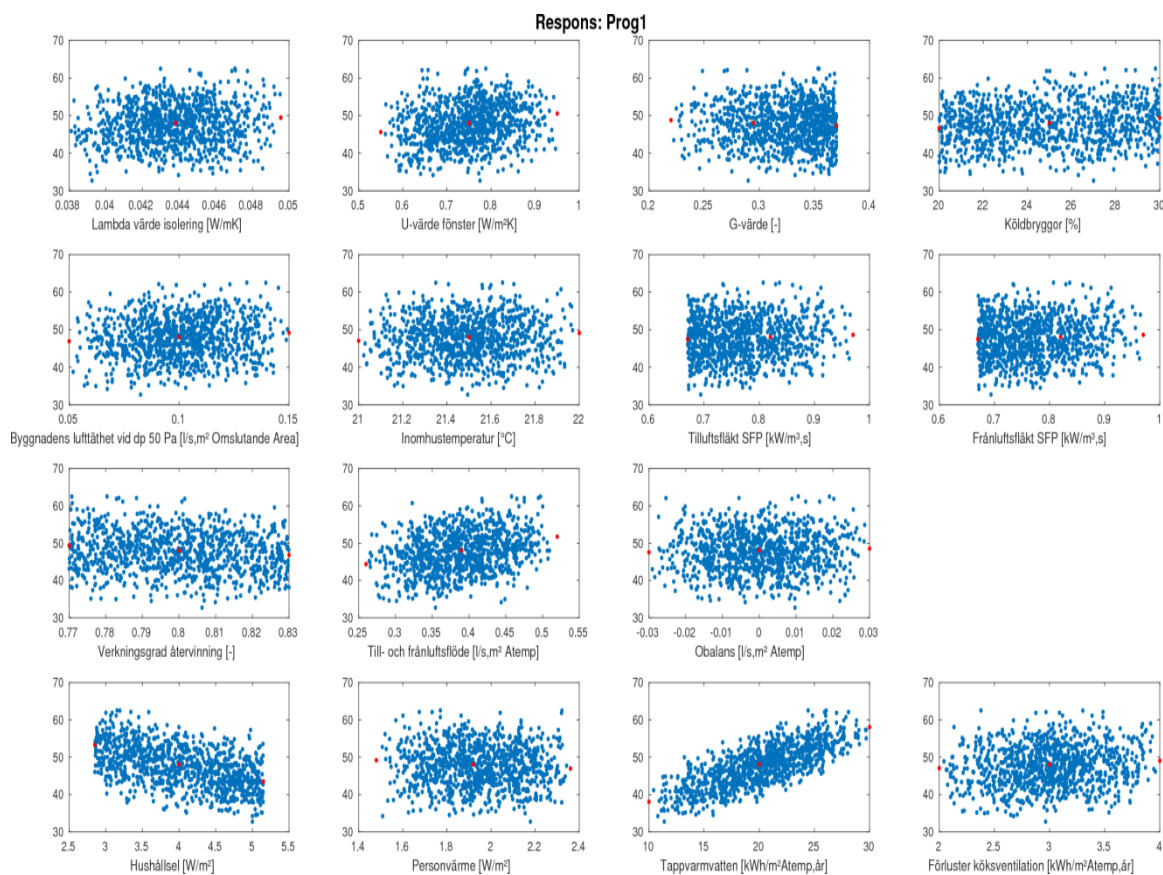
Resultat av beräkningen

De preliminära resultaten för beräknad energianvändning visas i Figur 6. 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 testfallet 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 7 och Figur 8 denna som funktion av de olika indataparametrarna. Märk dock att för de blåpunkterna så ändras alla inparametrar samtidigt och de röda punkterna svarar mot att endast den angivna

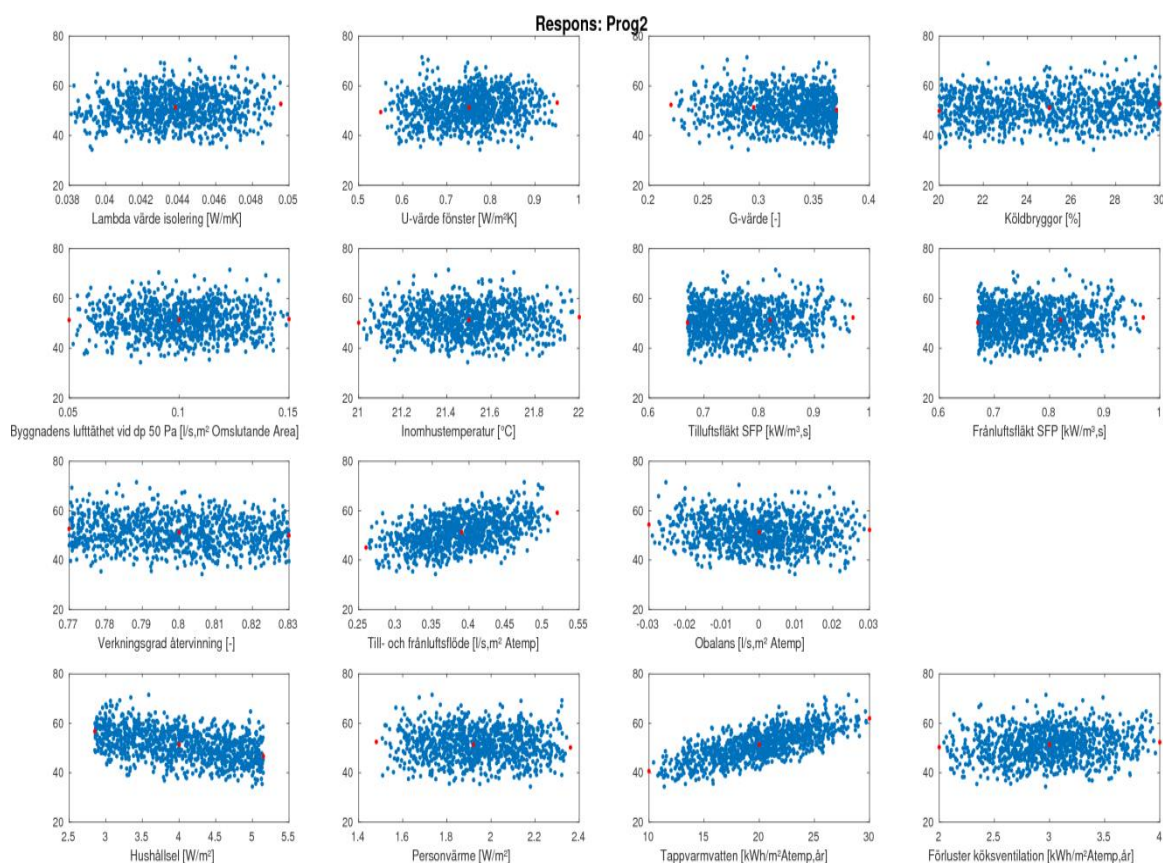
parametern tillåts ändras och hålla allt annat fixt. Den tomma platsen i figurerna svarar mot VVC-förluster som inte finns med i passivhuset.



Figur 6 Tvådimensionellt histogram över beräknad energianvändning för Passivhuset. På koordinataxlarna finns medelvärde, median och kvantiler markerade för respektive beräkningsprogram.



Figur 7 Respons mot indata för passivhuset med beräkningsprogram i läsordning Lambda, U-värde, g-värde, köldbryggor, luftläckage, inomhustemp, Tilluftsfläkt frånluftsfläkt, verkningsgrad återvinning, tilluftsflöde, flödesobalans, hushållsel, personvärme, TVV, köksventilation.



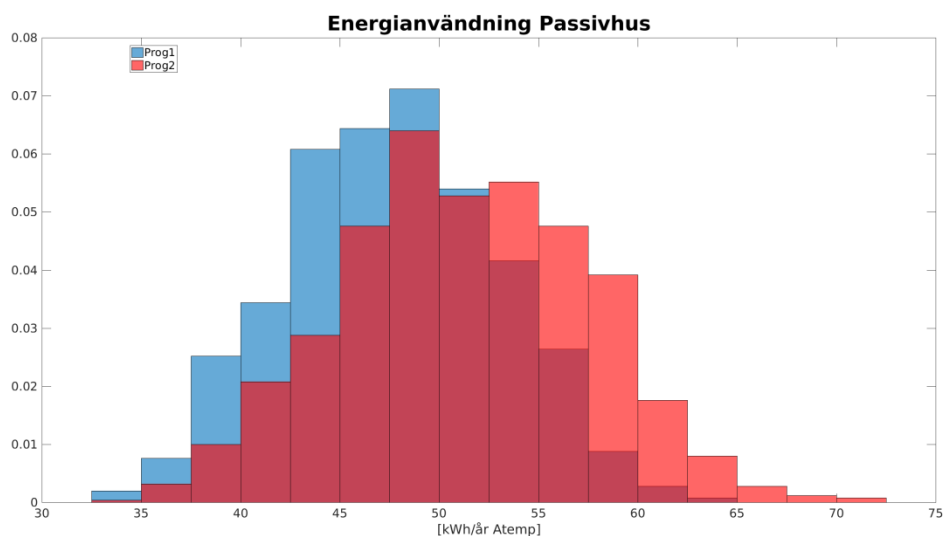
Figur 8 Respons mot underliggande för passivhuset med beräkningsprogram 2 i läsoordning Lambda, U-värde, g-värde, köldbryggor, luftläckage, inomhustemp, Tilluftsfläkt frånluftsfläkt, verkningsgrad återvinning, tilluftsflöde, flödesobalans, hushållsel, personvärme, TVV, köksventilation.

I Tabell 5 ges inverkan på beräknad energianvändning på samma sätt som i provfall 1. 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 5: Inverkan från inparametrar på energianvändning i passivhuset.

Parameter	PROG1	PROG2
TVV	0.74	0.69
Hushållsel	-0.52	-0.46
Tilluftsflöde	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
Tilluftsfläkt SFP	0.05	0.07
Frånluftsfläkt SFP	0.05	0.07
Obalans (frånluftflöde)	0.03	-0.08

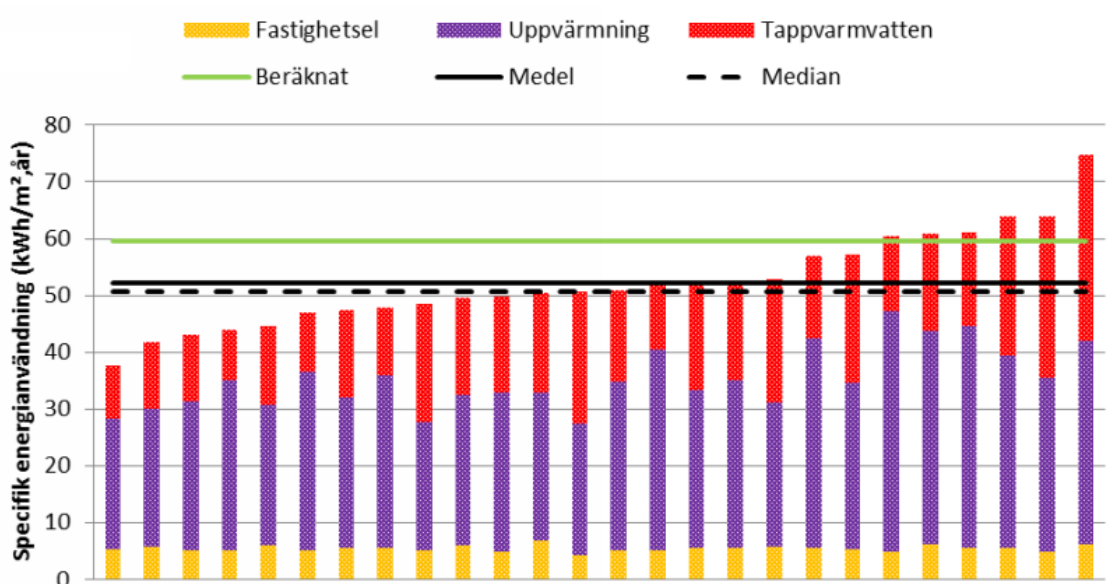
Beräkningsresultatet från både programmen syns i Figur 9 för passivhus fallet. Programmen visar bra överensstämmelse även i denna energibalansberäkning.



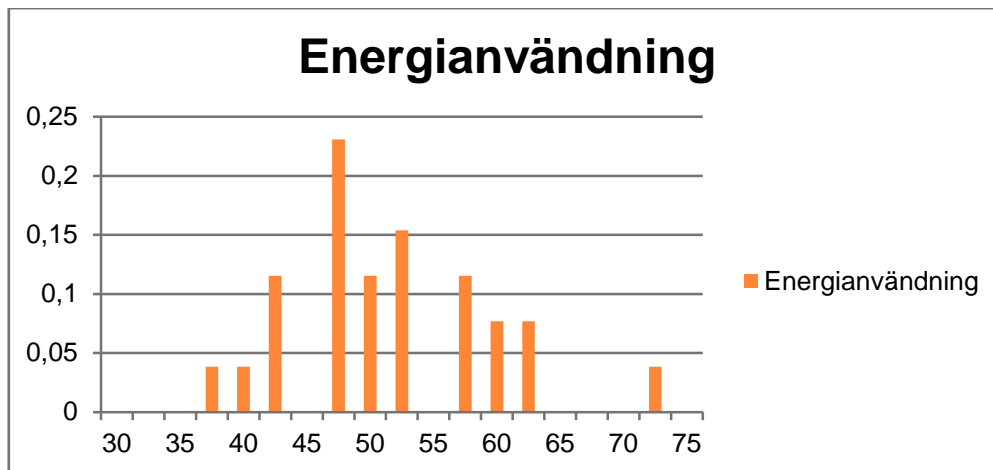
Figur 9: Beräkningsresultat från både programmen.

Analys av resultatet: Provfall 2 - Passivhus

Figur 10 och Figur 11 visar den uppmätta energianvändningen i 26 passivhus byggda enligt underlaget för Provfall 2. Uppmätt energianvändning stämmer väl överens med beräkningsresultat i Figur 9! 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. NCCs 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 det faktiska energianvändningen skulle var högre än originalberäkningen.



Figur 10: Uppmätt energianvändning i 26 passivhus byggde enligt underlaget för Provfall 2.



Figur 11: Distribution av uppmätt energianvändning.

MODELLER FÖR BRUKANDE

I ansökan planerades ett arbete med att implementera stokastiska brukarmodeller. Som en följd av detta har närvaromodellen av Page (2007) implementerats av EQUA. Men endast inledande studier har genomförts med modellen.

Under projektets gång har ett omfattande annat arbete på detta område startats och börjat ge resultat. Inom IEA-EBC Annex 66 samarbetar 57 grupper från 24 länder med att sätta upp en struktur av hur brukarbeteende skall kunna beskrivas, modelleras och mätas. Detta arbete har varit mycket produktivt och ett sk. DNAS framework (Drivers-Needs-Actions-Systems) har formulerats (<https://behavior.lbl.gov/>). Syftet är att ta fram metoder och verktyg som skall kunna inlemmas i dynamiska beräkningsprogram för byggnader.

I skenet av detta imponerande arbete har ambitionen att utveckla motsvarande modeller utan kontakt med Annex 66 DNAS inom det aktuella projektet bedömts som mindre intressant. Resurserna har istället lagts på övriga uppgifter inom projektet.

Arbetet inom Annex 66 har resulterat i färdiga programmoduler som kan anropas från byggsimuleringsprogram. Programmoduler kan komma att kopplas in för tester i svenska beräkningsprogram i ett uppföljande projekt.

SLUTSATSER

Under arbetet har prototypversioner av beräkningsverktygen utvecklats. Dessa är inte tillgängliga för kunder. Båda programtillverkarna avser dock att inlemma 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 genomfört i 26 passivhus stämde mycket väl överens med energibalansberäkningen med Monte Carlo-metoden!

Denna studie har också visat att mycket krävs av energiberäknaren 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 tiotalet 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.

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 studera inverkan på energianvändningen av kombinationer av indatavärden med spridningar.

CITERADE ARBETEN

- Almeida, R., & Ramos, N. (15-19 June, 2014). Influence of input data uncertainty in school buildings energy simulations. *10th Nordic Symposium on Building Physics Proceedings*.
- Bagge, H., Elmroth, A., & Lindstrii, L. (2004). *Energianvändning och inneklimat i två energieffektiva småhus i Västra Hamnen i Malmö (Energy use and indoor climate in two energy efficient single family dwellings in the western harbour in Malmö, In Swedish)*. Lund: Department of Building Physics, Lund University.
- BeBo. (2015). *Kartläggning av VVC-förluster i flerbostadshus - mätningar i 12 fastigheter*. Stockholm: BeBo.
- Bergsten, B. (2001). *Energiberäkningsprogram för byggnader - en jämförelse utifrån funktions- och användaraspekter (Energy calculation programs for buildings - a comparison from a function and user perspective, in Swedish)*. Hämtat från <https://www.sp.se/sv/index/research/effektiv/publikationer/Documents/Projektrapporter/Rapport%2001-03.pdf> den 23 01 2017
- Boverket. (2009). *Uppföljning av nya byggnaders specifika energianvändning (Follow-up of new buildings specific energy use, In Swedish)*. Hämtat från http://cisbo.dk/sites/default/files/Uppfoljning_nya%20byggnaders_specifika_energianvan_dning.pdf den 22 01 2017
- Boverket. (augusti 2012). *Handbok för energihushållning enligt Boverkets byggregler*. Hämtat från <http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2012/handbok-for-energi-hushallning-enligt-boverkets-byggregler.pdf> den 28 06 2017
- Boverket. (2016). *Boverkets byggregler - föreskrifter och allmänna råd, BBR (Boverkets building code - regulations and general advice, BBR, in Swedish)*. Hämtat från http://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_2011-6.pdf den 25 01 2017
- Dyrstad Pettersen, T. (1997). *Uncertainty analyses of energy consumption in dwellings*. Trondheim: NTNU.
- Filipsson, P., & Dalenbäck, J.-O. (2014). *Energiberäkningar - Avvikelser 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.
- Irminger-Street, C. (2008). *Beräkning och uppföljning av energianvändning i lokalbyggnader - Förenklad indata till en avancerad beräkningsmodell (Calculation and follow up of energy use in a commercial building - simplified input data for an advanced calculation model, In Swedish)*. Lund: Department of Building Services, Lund University.

- Janson, U. (2017). *Lämpliga säkerhetsmarginaler i energiberäkningar - säkerhetsmarginal för osäkerheter i indata (Suitable safety margins for energy calculations - safety margins for uncertain input data, in Swedish)*. Stockholm: SBUF Report 13106 from www.sbuf.se.
- Janssen, H. (2013). Monte-Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and sample convergence. *Reliability Engineering and System Safety*(109).
- Jansson, A., & Hansén, M. (2015). *Putsade enstegstättade regelväggar - Erfarenheter från undersökningar som SP har utfört*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Jensen, L. (2008). *Analys av osäkerhet i beräkning av energianvändning i hus och utveckling av säkerhetsfaktorer - direktmetoden*. Lund: Avdelning för installationsteknik, Institutionen för bygg- och miljöteknologi, Lunds tekniska högskola.
- Jiang, Y., & Hong, T. (1993). Stochastic Analysis of Building Thermal Processes. *Building and Environment*, 28(4), 509-518.
- Kurkinen, E.-L., Filipsson, P., Elfborg, S., & Ruud, S. (2014). *Difference between calculated and actual energy use - Energy Control during the construction process, in Swedish*. Borås: SP Technical Research Institute of Sweden.
- Lee, P., & et al. (2014). Probabilistic risk assessment of the energy saving shortfall in energy performance contracting projects - A case study. *Energy and Buildings*(66), 353-363.
- Levander, T., & Stengård, L. (2009). *Mätning av kall- och varmvattenanvändning i 44 hushåll*. Eskilstuna: Statens energimyndighet.
- Lindqvist, P., Jönsson, J., & Ekvall, T. (2013). *Miljonprogrammet - Förutsättningar och möjligheter*. Hämtat från TMF:
<http://www.tmf.se/BinaryLoader.axd?OwnerID=7513b915-4842-47fc-9786-dbd1e6467e&OwnerType=0&PropertyName=Files&FileName=2013+Renoveringsbehov+++miljonprogrammet.pdf&Attachment=True> den 05 08 2016
- Morris, M. (May 1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2).
- Nilsson, A. (2003). *Energianvändning i nybyggda flerbostadshus på Bo01-området i Malmö (Energy use in newly built multi-family dwellings at Bo01 in Malmö, In Swedish)*. Department of Building Physics. Lund: Lund University.
- Page, J. (2007). *Simulating occupant presence and behaviour in buildings*. Switzerland : ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- S. Olof, M.-P. (2015). *Moisture Safety in Wood Frame Buildings - Blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety*. Hämtat från
http://www.byfy.lth.se/fileadmin/kstr/images/personal/TVBH-1021_web__Part_one.pdf
den 23 06 2016
- Sveby. (2012). *Brucarindata bostäder*. Stockholm: Svebyprogrammet.

- Sveby. (2012). *Resultat från energiberäkningstävling för ett flerbostadshus (Results from the energy calculation competition for a multi-family house, in Swedish)*. Hämtat från <http://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/01/Etavlingsrapport-Sveby-111003.pdf> den 23 01 2017
- Sveby. (2012). *Så här kommer byggherren och entreprenören överens om energianvändningen*. Hämtat från http://www.sveby.org/wp-content/uploads/2012/11/Sveby_folder_webb.pdf den 05 06 2017
- Sveby. (2016). *Utveckling av energiberäkningar – Energiberäkningstävling för Hedlundaskolan (Development of energy calculations – Energy calculation competition for Hedlunda school, in Swedish)*. Hämtat från <http://www.sveby.org/wp-content/uploads/2016/11/Sveby-Energiber%C3%A4kningst%C3%A4vling-1609281.pdf> den 23 01 2017
- Sveby. (u.d.). *Om Sveby (About Sveby, in Swedish)*. Hämtat från <http://www.sveby.org/om-sveby/> den 23 01 2017
- Talevska, A., & Fakhro, O. (2016). *Fuktegenskaper hos magnesiumoxidskivor*. Hämtat från <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8880338&fileId=8884654> den 07 07 2016
- Wahlström, Å., Bergqvist, B., & Wikensten, B. (2015). *Mätning och utvärdering av värmeåtervinningsaggregat i befintliga flerbostadshus*. Göteborg: BeBo.
- Van Gelder, L., Janssen, H., & Roels, S. (2014). Reliability of meta-modelling in robust low-energy dwelling design. *10 Nordic Symposium on Building Physics Proceedings*. Lund.
- Wellholm, J. (2012). *Avvikelse mellan beräknad och faktisk energianvändning i byggnader - fallstudie av en fastighet byggd 2012 (Differences between calculated and actual energy use in buildings - a case study of a building from 2012, in Swedish)*. Uppsala: Uppsala University.