Analys av osäkerhet i beräkning av energianvändning i hus och utveckling av säkerhetsfaktorer

Slutrapport för forskningsprojekt

Med stöd från Energimyndigheten 30007-1 och SBUF 11768

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2010

Rapport TVIT--10/7059

Lunds Universitet

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

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.
Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmda hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspridning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Analys av osäkerhet i beräkning av energianvändning i hus och utveckling av säkerhetsfaktorer

Slutrapport för forskningsprojekt

Med stöd från Energimyndigheten 30007-1 och SBUF 11768

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2010
ISRN LUTVDG/TVIT--10/7059--SE(28)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 LUND

Innehållsförteckning

1 Inledning

Bakgrund

Bakgrund till detta forskningsprojekt är att det finns stora skillnader mellan beräknat energibehov och uppmätt energibehov. Några exempel är husen på Bo01 och även radhusen i Lindås. Energianvändningar beräknas utan att beakta osäkerhet hos indata.

En norsk avhandling av Trine Dyrstad Petersen visar att av den totala energianvändningen i ett bostadshus beror 70 % av osäkerheten de boendes vanor, 20-25 % av osäkerhet själva byggnaden och 5-10 % av osäkerheten uteklimatet.

Det kommer krav från EU-direktiv om att alla byggnader skall energideklareras. Detta ger möjligheter att kunna genomföra ett stort antal kontroller av befintliga beräkningsmetoden särskilt enklare beräkningsmetoder. Detta gäller även nya energihushållningsregler från Boverket med krav på verifiering inom två år.

Syfte

Ett kortsiktigt mål är att öka tillförlitligheten hos energiberäkningar genom att beakta osäkerheten och ta fram säkerhetsfaktorer. Resultat är att få bättre och säkrare prognoser med kända marginaler och sannolikhet. Ett långsiktigt mål är att öka tilltron till energiberäkningar.

Projektresultat

Forskningsarbetet har resulterat i fem arbetsrapporter, vilka refereras kortfattat här i avsnitt 2 och sammanställs nedan med titel, författare, rapportnummer och (sidantal).

Direktmetoden	Lars Jensen	TVIT—08/7030	(65)
Utetemperaturens osäkerhet	Lars Jensen	TVIT—10/7044	(94)
Solinstrålningens osäkerhet	Lars Jensen	TVIT—10/7047	(23)
Innetemperaturens osäkerhet	Lars Jensen	TVIT—10/7054	(32)
Partialkoefficientmetoden	Fredrik Carlsson	TVIT—10/7060	(39)

En svaghet med att ta fram olika säkerhetsfaktorer för energianvändningen i en byggnad är att säkerhetsfaktorerna kommer att vara olika för olika byggnader, olika för olika brukare, olika för olika klimat och olika för olika datorprogram. De antagna osäkerheterna kommer att vara helt bestämmande. Det är inte heller självklart hur säkerhetsfaktorerna skall ansättas på primära variabler som innetemperatur eller som energipost för tillförd energi, solvärmetillskott eller liknande.

En annan svaghet är att under vissa förutsättningar framräknade säkerhetsfaktorer endast gäller för de givna förutsättningarna. En tredje svaghet är hur metoden skall tillämpas utan allt för stor arbetsinsats. Räcker det med enkla handberäkningar eller krävs det datorberäkningar?

En alternativ lösning direktmetoden

En alternativ lösning är en metod som utgår för vad som gäller för enbart den aktuella byggnaden och beräknar energianvändningen för ett stort antal slumpmässiga fall med de osäkerheter som antas gälla. Metoden kan benämnas direktmetoden. En tillämpning är att med ett stort antal beräkningar sortera fram eller skatta av den sökta kvantilgränsen. En effektivare tillämpning bygger på teorin kring stickprov, vilket minskar antalet beräkningar och kräver en utökad beräkning av den sökta kvantilgränsen.

Ett annat tillämpningssätt, benämnd den minimala direktmetoden, bygger på att beräkna känslighetsderivator för varje osäker variabel och med dessa derivator skatta den totala spridningen för energianvändningen. Metoden kräver endast en beräkning för varje osäker variabel utöver en beräkning som avser endast medelvärden.

Kontakt har tagits med energiberäkningsprogramleverantörer för att undersöka intresset för att implementera direktmetoden i befintliga energiberäkningsprogram. Intresset var litet. Ett skäl mot en implementering av direktmetoden var att utökningen krävde viss programmeringsinsats och därmed en påtagligt extra kostnad. Ett annat skäl var att beräkning med osäkerheter dels oroade brukarna, dels krävde utökade manualer och mer utbildning. Det fanns också andra utökningar och uppdateringar av programvara som var viktigare. Möjligheten att utöka ett befintligt energiberäkningsprogram med möjligheten att skatta osäkerheten var helt enkelt inte tillräckligt attraktivt.

Den minimala direktmetoden = Normal felanalys

Den minimala direktmetoden är inget annat en regelrätt felanalys, som använder numerisk eller analytisk derivering för att bestämma känslighet eller derivator för olika variabler. Den numeriska direktmetoden sammanfattas i denna slutrapport i avsnitt 3.

Den numeriska direktmetoden kan tillämpas av en brukare med ett Excel-program, vilket också redovisas i avsnitt 3. Den stora fördelen är att brukaren direkt ser hur mycket olika variabler påverkar det aktuella energianvändningsvärdets osäkerhet.

Ett annat tillämpningssätt är att skatta olika känslighetsderivator analytiskt och inte numeriskt. Detta innebär att endast en energiberäkning görs för att bestämma medelvärdet. Osäkerheten kring medelvärdet skattas analytiskt med beräknade derivator och tillhörande variablers osäkerhet. Denna metod kan beskrivas som normal felanalys av en godtycklig beräkning och redovisas i avsnitt 4 med energiberäkning med en förenklad °Ch-funktion.

Det går också att kombinera den analytiska direktmetoden med den numeriska direktmetoden, när analytiska derivator är svåra eller omöjliga att beräkna, kan de ersättas av numeriska derivator, vilka kräver en extra energiberäkning för varje numerisk derivata.

2 Resultat arbetsrapporter

Ett kort sammanfattning av resultatet för projektets fem arbetsrapporter redovisas här.

Direktmetoden TVIT—08/7030

Direktmetoden är ett alternativ till att bestämma energiberäkningars osäkerhet. Ordet direkt kan uttolkas som att direkt beräkna flera energiberäkningar med slumpmässiga indata och på olika sätt skatt osäkerheten. Den 65-sidiga rapporten har tio avsnitt. Olika frågeställningar gås igenom i avsnitt 2. Ett problem är att det saknas data särskilt om beroende mellan olika variabler.

Energiberäkningar är omfattande och har många indata varav många kan vara beroende. En enkel principanalys i avsnitt 3 av summa, produkt och division mellan två slumpmässiga variabler visar att inverkan av helt beroende variabler inte kan försummas, om standardavvikelsen är stor i för hållandet till medelvärdet. Division resulterar i ett högre medelvärde än division mellan de två medelvärdena. Felet är dock försumbart om förhållandet mellan medelvärde och standardavvikelse är 5:1.

En mer tillämpad analys med en energiberäkning för en byggnad görs i avsnitt 4. Fem fall med olika helt beroende variabler räknades igenom. Den ena slutsatsen är att medelvärdet påverkas marginellt. Den andra slutsatsen är att korrelationen mellan olika variabler påverkar spridningen betydligt.

En direkt metod för att bestämma en beräknings osäkerhet är att genomföra att stort antal beräkningar med slumpmässiga indata. Sannolikheten för att en given gräns överskrids kan enkelt sorteras fram från de genomförda beräkningarnas resultat. Det går också att skatta medelvärde och standardavvikelse för resultatet och räkna fram den sökta sannolikheten för en given gräns.

Antalet beräkningar som krävs är stort och tidskrävande att genomföra. Ett alternativ för att minska antalet beräkningar, är att använda teknik för stickprovskontroll för att skatta den sökta sannolikheten för en given gräns. Detta redovisas i avsnitt 6. Resultatet är att antalet beräkningar kan minskas, men säkerhetsmarginalen måste ökas.

Den minimala direktmetoden med endast en extra beräkning per osäker variabel beskrivs teoretiskt och praktiskt i avsnitt 7 respektive 8 samt och testas tillämpat i avsnitt 9. Delar från avsnitt 7. 9 och 9 redovisas till vissa delar i denna slutrapports avsnitt 3 och 4. Slutsatsen är att den minimala direktmetoden skattar den sökta kvantilgränsen väl jämfört med ett stort antal slumpmässiga beräkningar. Exempel på hur den minimala direktmetoden kan tillämpas med hjälp av Excel och förenklas redovisas här i avsnitt 3.

Utetemperaturens osäkerhet TVIT—10/7044

Utetemperaturens osäkerhet undersöks i den 94-sidiga arbetsrapporten med mätdata från SMHI för 25 väderstationer och för åren 1961-2008.

Ett mindre resultat var att den årliga temperaturökning bestämdes till 0.04 ºC/år Den ändring har inte har någon betydelse för att bestämma uteklimatet ett år framåt i tiden som för fallet vid en beräkning av energibehovet för uppvärmning och ventilation. Den årliga variationen för medel-värdet för hela Sverige för tidsperioden 1961-2008 är betydande. Standardavvikelsen är avrundat 1 ºC.

Hur osäker utetemperaturen är i tiden undersöktes i avsnitt 4 indirekt genom att beräkna °Ch-värden för olika gränstemperaturer. Spridning eller osäkerheten för dessa °Ch-värden räknades om till en ändrad utetemperatur för aktuell driftstid eller utslaget över hela året. Spridningen mellan olika orter är måttlig. Minsta, medel, största och standardavvikelse för ändrad utetemperatur för aktuell driftstid redovisas i Tabell 2.1 för gränstemperaturerna 0(5)25 °C hämtat från arbetsrapportens Tabell 4.10-13.

En enkel sammanfattning av utetemperaturens tidsberoende osäkerhet är avrundat 1 °C för normal uppvärmning och ventilation för en gränstemperatur eller innetemperatur om 20 °C.

Tabell 2.1 Minsta, medel, största, std för utetemperaturosäkerhet

°C	min ΔT_t °C	medel ΔT_t °C	max ΔT_t °C	std ΔT_t °C
0	1.98	2.42	2.78	0.26
5	1.46	1.70	1.94	0.14
10	1.18	1.40	1.57	0.12
15	1.05	1.21	1.34	0.09
20	0.91	1.06	1.21	0.07
25	0.87	1.02	1.18	0.07

Hur utetemperaturen för en ort kan beskrivas med data från andra orter har undersökts i arbetsrapportens avsnitt 4 med några olika metoder. Den allra enklaste metoden är att använda den närmaste stationen för ett beskriva en annan ort. Resultatet är inte användbart. En förklaring är att avstånden mellan olika stationer är förhållandevis stora.

Den annan enkel metod är att finna en station som bäst beskriver en annan station. Detta resulterar i måttliga fel, men det finns inget enkelt sätt att bestämma vilken som är den bästa stationen för en annan station.

En sammanvägning av flera närliggande stationer efter avstånd kan tyckas vara en bra metod, om den sökta orten ligger omgiven av de närliggande stationerna som skall användas. Tester gjordes med olika antal närliggande stationer och olika viktningsfunktioner efter avstånd. Resultatet urartade mer eller mindre till sammanvägning till den närmsta stationen.

En annan och bättre sammanvägning efter geografiskt läge provades med viss framgång. Fördelen med att ta hänsyn till det geografiska läget innebär att en form av interpolation eller extrapolation. Det geografiska läget beskrevs med lattitud och longitud alternativt med tre sfäriska koordin-ater för lattitud och longitud samt kombinerat utan eller höjdläge.

Denna metod provades med anpassning av ett mindre antal närliggande stationer, till alla stationer och alla utom aktuell station samt med en förenklad °Ch-funktion enligt slutrapportens samband (4.12-15) och ett °Ch-värde för varje gränstemperatur sammanvägdes från andra stationers °Ch-värden.

Metoden med den förenklade °Ch-funktionen med endast tio modellparametrar gav nästa samma resultat som den mer omfattande metoden med fem parametrar för varje ingående gränstemperatur, vilket blir 125 parametrar om området som skall beskriva är från 0 till 20 °C. Antalet modellparametrar blir därför orimligt stort. Det förutsätts att det geografiska läget beskrivs med sfäriska koordinater.

Huvudslutsatsen är att utetemperaturen för en annan ort kan beskrivas med ett rimligt fel genom en sammanvägning efter det geografiska läget och med en förenklad °Ch-funktion. Rotmedelkvadratfelet redovisat är mindre än 2.0 k°Ch för att beskriva alla stationer med varandra samt mindre än 2.5 k°Ch för att beskriva en station med övriga stationer. Dessa fel kan för jämförelsens skull beskrivas som ett fel i utetemperaturen mindre än 0.5 °C under 4000 respektive 5000 h.

Utetemperaturens osäkerhet eller standardavvikelse sätts samman av den tidsmässiga osäkerheten och den geografiska osäkerheten. Båda är rimligen oberoende av varandra. En kvadratisk summering till ett enda värde resulterar i ett bara något större värde än det för den tidsmässiga osäkerheten, eftersom den geografiska osäkerheten är betydligt mindre. Sifferexempel med 1 °C och 0.5 °C ger sammanvägt 1.1 °C $(1^2+0.5^2)^{0.5}$ och 1.5 °C och 0.5 °C ger sammanvägt 1.6 °C $(1.5^2+0.5^2)^{0.5}$. Den geografiska osäkerheten kan därför nästan försummas jämfört med den tidsmässiga osäkerheten.

Solinstrålningens osäkerhet TVIT—10/7047

Solinstrålningens osäkerhet har behandlats i en 23 sidig arbetsrapport. Mätdata från SMHI för Borlänge, Luleå, Lund och Stockholm och åren 1990-1998 har använts. Utetemperaturen °C och främst solinstrålning global mot en horisontell yta W/m^2 har bearbetats. Solinstrålningens osäkerhet över tiden är ganska måttlig. Medelvärde och standardavvikelse för global solinstrålning för en horisontell yta för de fyra orterna är 933, 884, 998 och 954 kWh/m^2 respektive 49, 39, 45 och 42 kWh/m^2. Kvoten mellan standardavvikelse och medelvärde är genomgående mindre än 0.05.

Solinstrålningens osäkerhet sett för ett helt år är av mindre intresse, eftersom den stora solinstrålningen sommartid endast kan utnyttjas för solvärmesystem för tappvarmvatten. Den intressanta delen är solinstrålning för utetemperaturer under en given gränstemperatur när en byggnad måste värmas aktivt på något sätt. Detta har undersökts i avsnitt 4. Resultatet blev att den relativa osäkerheten för global solinstrålning var mindre än 0.1 för gränstemperaturer högre 10 °C och omvänt. Det skall också tilläggas att den globala solinstrålningen under 10 °C är mindre än en tredjedel av den globala solinstrålningen över ett helt år.

Ett sammanfattande överslag för solinstrålningens osäkerhet är att den relativa osäkerheten är mindre än 0.1 för gränstemperaturer över 10 °C samt mindre än 0.2 för gränstemperaturer över 5 °C.

Den uppskattade relativa osäkerheten för solinstrålning kan tillämpas som följer vid en energiberäkning. Solinstrålningen ökas eller minskas med osäkerheten genom att ändra soltransmissionen för alla fönster uppåt eller neråt med ett värde som motsvarande den relativa osäkerheten, vilken bestäms för gränstemperaturen för aktiv uppvärmning för solinstrålning utan någon osäkerhet.

Det finns en mindre negativ korrelation mellan utetemperatur och global solinstrålning vintertid. Detta kan förklaras med att soliga dagar vintertid är kalla dagar beroende på en större utstrålning. Korrelationen för vinterhalvåret oktober-mars något avrundat omkring -0.33, vilket är liten korrelation som försummas med resultat att energianvändningen överskattas något.

Någon osäkerhet för solinstrålning för orter utan mätvärden har inte skattats. Antalet väderstationer är för litet. En enkel jämförelse med °Ch och kWh/m^2 visas dock i Tabell 2.2 med Lund som referens. Skillnaden mellan de fyra orterna är mindre för kWh/m^2 än för °Ch. Skillnader i solinstrålning är små mellan Borlänge, Lund och Stockholm, vilket visar att interpolation kan ge rimliga reslutat.

Tabell 2.2 Jämförelse °Ch och kWh/m^2 för Borlänge, Luleå och Stockholm relativt Lund

°C	k°Ch Lund	Borlänge /Lund	Luleå /Lund	Stockholm /Lund	kWh/m^2 Lund	Borlänge /Lund	Luleå /Lund	Stockholm /Lund
0	34.51	2.08	2.18	1.28	253.66	0.99	1.43	1.01
10	64.82	1.61	1.70	1.17	471.43	0.92	1.18	0.96
20	103.48	1.39	1.46	1.11	764.05	0.89	1.04	0.92

Innetemperaturens osäkerhet TVIT—10/7054

I denna arbetsrapport redovisas resultat från de två stora undersökningarna ELIB och BETSI, som avser hela bostadsbeståndet, visar att osäkerheten eller standardavvikelse för innetemperaturen är ganska stor. Siffervärden har skattats från redovisade stapeldiagram för småhus till 1.41 °C respektive 1.29 °C samt för flerbostadshus till 1.66 °C respektive 1.38 °C. Egna erfarenheter från långtidsmätningar av tio flerbostadshus med olika byggår och sexton nya radhus ger standardavvikelser på 1.12 °C respektive 1.13 °C för utetmperaturer under 10 °C. Slutsatsen är att innetemperaturens standardavvikelse ligger klart över 1 °C.

Partialkoefficientmetoden TVIT—10/7060

Detta är en metod för att ta fram konstruktioner med en minsta brottsannolikhet. Tillämpningen sker genom att olika laster multipliceras med en partialkoefficient större än ett och att bärförmågan divideras med en partialkoefficient större än ett. Partialkoefficienterna för konstruktioner har tagits fram genom omfattande beräkningar och praktiska erfarenheter.

En annan tillämpning som testas i detta forskningsprojekt är att kravet på att energianvändningen i en byggnad inte skall överskrida ett gränsvärde med en viss sannolikhet. Metoden har tillämpas för ett flerbostadshus med en enkel årsenergiberäkning. Resultatet blev i det aktuella fallet att temperaturskillnaden inne-ute ökades med faktorn 1.1 och att frånluftsvärmepumpens värmefaktor minskades med faktorn 0.95.

3 Minimal direktmetod

Den minimala direktmetoden bygger på att en årsenergiberäkning alltid görs med något datorprogram. Det gäller därför att utnyttja samma datorprogram för att skatta en kvantilgräns med en given sannolikhet för energianvändningen. Det finns flera fördelar med att bygga ut befintliga datorprogram med denna sökta skattningsfunktion.

Tillämpbarhet, tydlighet, enkelhet och betydelse

Direktmetoden tillämpas med ett befintligt energiberäkningsprogram. Det framgår klart vilka medelvärden och osäkerheter som används i beräkningarna. Absoluta värden och relativa osäkerhetsfaktorer kan användas. Vissa variabler anses vara helt säkra. Alla slumpmässiga variabler antas vara oberoende. Skattningsmodell är enkel och kräver ett fåtal beräkningar av energianvändningen. Det finns en förklaringskvot för varje osäkerhetsvariabel som anger hur stor del av energianvändningens standardavvikelse som beror på aktuell variabel.

Användbarhet, aktualitet och uppdatering

Den minimala direktmetoden är lätt att använda, eftersom beräkningar sker med ett befintligt energiberäkningsprogram.

Indata till energiberäkningen är givetvis byggnadens data samt absoluta och relativa osäkerheter i form av medelvärden och standardavvikelser för byggnadsdata, klimatdata och brukardata. Detta innebär att det är lätt att direkt ändra grundförutsättningarna för olika osäkerheter. Det kan vara att beräkning med olika byggnadsdata, klimatdata eller brukarindata skall ske med nya medelvärden och standardavvikelser efter nya mäterfarenheter har framkommit.

Det krav som skall uppfyllas kan också revideras och förändras, vilket direktmetoden enkelt kan anpassas till genom att beräkningen av energianvändningen utökas eller minskas med olika energiposter. Dagens krav avser inte hushållselförbrukning, vilken till stor del tillgodoräknas för uppvärmning och ventilation av en byggnad.

Användarvänlighet och generalitet

En ytterst viktig synpunkt för en beräkningsmetod är att den är lätt använda utan kräva omfattande indata och extra beräkningar med andra datorprogram än de gängse. Direktmetoden avser inte någon särskild byggnadstyp utan kan tillämpas på alla byggnadstyper. Det skall inte vara någon skillnad på om det gäller ett småhus, ett radhus, ett flerbostadshus eller någon form av lokal bortsett från att osäkra variablers medelvärde och standardavvikelse.

Klimatskal

Klimatskalet kan delas upp i ett antal olika ytor med olika egenskaper. Ytorna storlek kan ges direkt eller beräknas utifrån angivna mått. Ytor kan vara nettoytor sett inifrån en byggnads olika rum och lokaler eller vara bruttoytor sett utifrån. Fallet med nettoytor kompletteras med köldbryggor för olika övergångar mellan olika nettoytor. Köldbryggorna ingår mer eller mindre för fallet med bruttoytor.

Osäkerheter för klimatskalets ytor bör vara liten. Det kan vara avrundning till minsta steg om 0.1 m^2. Detta gäller även ytornas eller egentligen byggdelarnas egenskaper i form av U-värden. Det finns dock påslag för U-värden för olika konstruktioner för osäkerheter i utförandet i form av ΔU_p. En bedömning är att ange en relativ osäkerhet för alla U-värden, eftersom en absolut osäkerhet har stor inverkan på en konstruktion med ett lågt U-värde.

Den största osäkerheten orsakas av köldbryggor som i många beräkningar har försummats mer eller mindre. Köldbryggornas längd omfattar i princip alla kantlinjer mellan olika bygg-delar och även omkretsarna kring alla fönster eller dörrar, vilket för ett kvadratiskt enplanshus med sidan 10 m blir 90 m för endast övergångar mellan golv, fasader och tak och för fönsters och dörrars omkrets fås ytterligare 60 m för 12 st 1 m^2 fönster och för 2 st 2 m^2 dörrar. Köld-bryggornas u-värde kring fönster och dörrar är dock endast 0.03 W/Km för träregelhus, medan övergången mellan ytterväggar och platta på mark kan vara 0.2 W/Km.

Om en byggnads isolertjocklek fördubblas nästan halveras byggdelarnas U-värden, men också köldbryggorna mellan golv, fasader och tak. Köldbryggorna kring fönster och dörrar är där-emot de samma under förutsättning att fönsters och dörrars karmdjup inte ökar.

Andra viktiga egenskaper för klimatskalet är fönsters g-faktorer, som anger hur stor del av den infallande solinstrålningen som går igenom fönstret. Klimatskalets övriga ytor påverkas också av solinstrålning beroende på absorbtionsförmåga och emissivitet. Bakomliggande luftspalter kan minska solinstrålningens inverkan på en byggdels värmeförlust.

Ventilation

Ventilationsflödet skall uppfylla krav på minsta uteluftsflöde enligt BBR, vilket för bostäder är 0.35 l/sm^2. Ventilationsflödet kan kontrolleras med en måttlig noggrannhet, relativt sett 1/10-del. Ventilationsflödet är i stort sett konstant över året bortsett från problem med igensättning av filter och påfrysning av ventilationsvärmeåtervinnare.

Ventilationsvärmebehovet kan endast minskas genom någon form av återvinning genom att använda sig av tillochfrånluftsventilation med en plattvärmeväxlare av något slag. Verknings-graden för plattvärmeväxlaren är det som kan ändras för att minska värmebehovet för ventila-tion. Verkningsgraden är inte konstant utan den påverkas av påfrysning vid låga utetempera-turer. Höga verkningsgrader kan inte utnyttjas fullt ut. Detta beräkningsfel kan vara litet för ett hus i södra Sverige, men inte i norra Sverige. Isbildning kan i princip ske för utetempera-turen -5 °C, innetemperaturen 20 °C och temperaturverknigsgraden 0.8.

Utöver den vanliga ventilationen tillkommer i bostäder även någon form av köksfläkt vars flöde kan forceras under korta tider. Denna forcering innebär ventilationen totalt sett ökar något, men inte med hela forceringsflödet. Hur stor ökningen är beror på ventilationssystemets egenskaper och på byggnadens täthet.

In- och exfiltration

Storleken på infiltrationsflöde och exfiltrationsflöde beror på ventilationssystemets egenskaper, på byggnadens täthet, på temperaturförhållanden, på vindförhållanden och byggnadens inre höjd.

Ett infiltrationsflöde behöver inte öka en frånluftsventilerad byggnads värmebehov om inte det ökar det totala önskade frånluftsflödet.

Ett exfiltrationsflöde ökar i regel en byggnads värmebehov, eftersom en eventuell värmeåtervinning kommer att arbeta med ett mindre frånluftsflöde. Ett exfiltrationsflöde medför också risk för kondens i byggkonstruktionen och skall därför undvikas.

Infiltration och exfiltration ökar värmebehovet för en byggnad med FT-ventilationssystem.

Innetemperatur

En konstant innetemperatur över året är ett enkelt antagande även om innetemperaturen kan variera över året beroende på brukare och själva värmesystemets funktion. Sommartid kan innetemperaturen vara betydligt högre än under vintertid eller under själva uppvärmningssäsongen. Det viktiga är att beräkningar sker med rätt temperatur under uppvärmningssäsongen.

Det finns stora undersökningar genomförda på småhus och flerbostadshus som visar att innetemperaturen är något lägre i småhus än i flerbostadshus. Införande av individuell värmedebitering i flerbostadshus är något som kan minska skillnaden.

Uttemperatur och solinstrålning

Beräkningar bör ske med klimatdata för den mest snarlika väderstationen, vilket inte behöver vara den närmsta. Det gäller att beakta lokala skillnader i förhållande till vald klimatstation. Byggnadens läge i landskapet på en dalbotten eller en dalsida har en viss betydelse.

Ett problem är att alla år är mer eller mindre unika och det kan vara lämpligt att använda sig av ett syntetiska väderdata framräknade från flera års mätningar flera mätstationer.

Något som begränsar mängden solinstrålningen som kan nyttiggöras är omgivningens horisontalavskärmning och givetvis byggnadens egen avskärmning av fönster.

Personvärme

Personvärmetillskottet kan bestämmas ganska väl med antalet boende och deras närvaro.

Hushållsel

Hushållselens värmetillskottet kan till en del bestämmas ganska väl med antalet boende och deras närvaro. Det finns också för en bostad en fast del från kyl och frys samt från en eventuell varmvattenberedare, vilken har en mer eller mindre konstant värmeförlust.

Det finns också konstanta värmetillskott från akvarier, terrarier eller vattensängar som kan vara betydande och kan därför inte försummas.

Fastighetsel

Fastighetsel för ett småhus avser främst drift av ventilationssystem, medan för flerbostadshus tillkommer belysning och hissar. Lokaler som kontor och skolor har flera gånger mer ventilation än bostäder och därför är också fastighetselen betydligt större.

Varmvatten

Själva värmebehovet för varmvatten utöver en eventuell varmvattenberedarens värmeförlust beror på de boendes vanor. Det finns en del schablonsiffror att tillgå från en del stora undersökningar kopplat till en bostads storlek.

Medelvärde, osäkerhet och sökt kvantilgräns

Energianvändningen kan för en given byggnad *E( )* betraktas som en funktion av alla de ingående osäkra variablerna. Det går att bestämma denna funktion väl, eftersom funktionen beräknas numeriskt med hög noggrannhet. Det finns ingen osäkerhet i energianvändningen för givna indata. Först bestäms medelvärdet m_E som:

$$m_E = E(m) \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.1)$$

Sorten [kWh] har valts och inte sorten [kWh/m^2] som passar det sökta slutresultatet bättre. Det gäller därför först att bestämma energianvändningens känsligheten för varje ingående osäker variabel.

$$\sigma_{Ei} = |\ E(m + \sigma_i) - E(m)\ | \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.2)$$

Nästa steg är att med dessa känsligheter eller egentligen energianvändningens standardavvikelse för en viss variabels standardavvikelse bestämma energianvändningens förväntade standardavvikelse σ_E som:

$$\sigma_E = [\ \sigma_{Ei}^T\ B\ \sigma_{Ei}\ ]^{0.5} \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.3)$$

Den symmetriska matrisen B i (3.3) anger korrelationen mellan de ingående variablerna. Om alla ingående variabler är oberoende blir matrisen B lika med en enhetsmatris och sambandet (3.3) är lika med kvadratroten för kvadratsumman av de enskilda variablernas osäkerhet. Icke-diagonala matriselement $b_{ij} = b_{ji}$ anger graden av korrelation mellan olika variabler x_i och x_j.

Det sista steget är att beräkna energianvändningens kvantilgräns för en given sannolikhet och testa detta värde mot det uppställda kravet. Energianvändningens kvantilgräns $E_{0.9}$ för sannolikheten 0.9 kan med antagande om att normalfördelningen gäller beräknas som följer:

$$E_{0.9} = m_E + 1.28\ \sigma_E \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.4)$$

Det framräknade värdet $E_{0.9}$ kan nu testas mot den gräns som gäller bostäder eller lokaler och aktuell klimatzon efter division med den golvyta som gäller. Faktorn 1.28 ersätts med 0.84 och 1.64 för sannolikheterna 0.8 respektive 0.95.

Excel-tillämpning av den minimala direktmetoden

Principen för den minimala direktmetoden visas med nedanstående Excel-ark med indata till vänster och utdata till höger. Årsenergiberäkningarnas siffervärden är inte framräknade utan skall bara exemplifiera principen och jämna hundratal har valts för att underlätta läsandet. Årsenergibehovet är 15000 kWh eller 83.3 kWh/m^2 för boytan 180 m^2. Tolv osäkra variabler ingår i beräkningen. Alla variabler antas vara oberoende av varandra. Den resulterande standardavvikelsen för årsenergibehovet beräknas till 1916 kWh eller 10.6 kWh/m^2.

Nederst redovisas olika kvantilgränser för den totala och den ytspecifika årsenergiförbrukningen för sannolikheterna 0.5, 0.8, 0.9, 0.95, 0.98 och 0.99 samt omvänt för sannolikheten för givna kvantilgränser som 110 och 140 kWh/m^2.

Indata					Utdata			
	Boyta	180	m^2		Enetto	dEnetto	Enetto	dEnetto
					kWh	kWh	kWh/m^2	kWh/m^2
	normal beräkning				15000		83.3	
nr	osäkerhet	värde	sort					
1	innetemperatur	0.50	ºC		15600	600	86.7	3.3
2	utetemperatur	0.50	ºC		14300	-700	79.4	-3.9
3	solinstrålning	100.00	kWh/m^{2}år		14700	-300	81.7	-1.7
4	personnärvaro	1.00	st		14300	-700	79.4	-3.9
5	hushållsel	600.00	kWh/år		14600	-400	81.1	-2.2
6	varmvatten	800.00	kWh/år		14200	-800	78.9	-4.4
7	fasad, golv, takytor	0.50	m^2		15500	500	86.1	2.8
8	dito U-värde	0.01	W/m^{2}K		15700	700	87.2	3.9
9	fönsterytor	0.20	m^2		15400	400	85.6	2.2
10	fönster U-värde	0.10	W/m^{2}K		15300	300	85.0	1.7
11	ventilation	0.10	oms/h		15600	600	86.7	3.3
12	infiltration	0.05	oms/h		15300	300	85.0	1.7
	osäkerhet Enetto					1916		10.6
	Sannolikhet	faktor			Enetto		Enetto	
					kWh		kWh/m^2	
	0.50	0.0000			15000		83.3	
	0.80	0.8416			16612		92.3	
	0.90	1.2816			17455		97.0	
	0.95	1.6449			18151		100.8	
	0.98	2.0537			18934		105.2	
	0.99	2.3263			19457		108.1	
	0.994						110.0	
	1.000						140.0	

Förenklad tillämpning av den minimala direktmetoden

Beräkningsarbetet med den minimala direktmetoden kan förenklas genom att endast behandla de viktigaste variablerna som ger den största spridning i energianvändning. Ett urval av de viktigaste variabler är innetemperatur, utetemperatur, solinstrålning, byggnadens specifika värmeförlust, personvärme, hushållsel och varmvatten. Antalet variabler är sju och det krävs i princip en extra beräkning för varje variabel, men inverkan av vissa variabler är likartade och kan därför adderaseller skalas om, vilket visas längre ner i texten. Hur detta kan genomföras med ett mindre antal beräkningar än nödvändigt beskrivs nedan.

Inverkan av innetemperatur och utetemperatur är likartad. En höjning av den önskade innetemperaturen över året är lika med en motsvarande sänkning av utetemperaturen över året. Antag att osäkerheten för inne- och utetemperatur anges med standardavvikelserna σ_{inne} och σ_{ute}. Utetemperaturens standardavvikelserna σ_{ute} avser både osäkerhet i tiden och i geografin. Ett framräknat värde för innetemperaturens påverkan på energianvändningen σ_{Einne} kan enkelt skalas om till utetemperaturens påverkan på energianvändningen som:

$$\sigma_{Eute} = (\sigma_{ute} / \sigma_{inne})\, \sigma_{Einne} \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.5)$$

Solinstrålningens osäkerhets påverkan på energianvändningen σ_{Esol} kan beräknas genom att öka eller minska solinstrålningen med dess relativa osäkerhet enligt (3.2).

Osäkerheten för byggnadens specifika värmeförlust Q antas vara σ_Q, vilket är den framräknade osäkerheten för byggnadens alla ytor, köldbryggor och olika ventilationsflöden. Nödvändiga beräkningsuttryck för detta redovisas i nästa avsnitt som (4.40-41) där σ_Q anges som $\sigma(Q)$. Beräk-ningen av σ_{EQ} kan ske genom att ändra en lämplig term med σ_Q som ingår i den specifika värmeförlusten Q.

Inverkan av personvärme och hushållsel är likartad. En höjning av personvärmen över året är lika med en motsvarande höjning av hushållsel över året. De två variablerna är också mycket starkt beroende och kan i princip adderas och behandlas som en enda variabel och därför beräknas den gemensamma påverkan på energianvändningen σ_{Ep+hel} genom att öka personvärme med σ_p och hushållsel σ_{hel} eller med omskalning av ett fall till ett annat fall som tidigare för fallet med inne- och utetemperatur enligt (3.5).

Varmvattenvärmebehovet är mer eller mindre fristående till nettovärmebehovet och fastighetselbehovet och dess osäkerhet σ_{vv} kan för energianvändningen direkt anges som σ_{Evv} för ett fall med direktel. Det krävs inte någon extra energiberäkning för ett fall utan värmepump för tappvarmvattenberedning.

Boendets osäkerhet för personvärme, hushållsel och varmvatten kan för det allmänna fallet beräknas till σ_{Eb} med antagandet att personvärme, hushållsel och varmvattenbehov är beroende med faktorerna r, s och t som följer:

$$\sigma_{Eb} = [\, \sigma_{Ep}^2 + \sigma_{Ehel}^2 + \sigma_{Evv}^2 + 2\, r\, \sigma_{Ep}\, \sigma_{Ehel} + 2\, s\, \sigma_{Ep}\, \sigma_{Evv} + 2\, t\, \sigma_{Ehel}\, \sigma_{Evv}\,]^{0.5} \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.6)$$

Om personvärme, hushållsel och varmvatten är helt beroende $r = s = t = 1$ blir (3.6):

$$\sigma_{Eb} = \sigma_{Ep} + \sigma_{Ehel} + \sigma_{Evv} \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.7)$$

De olika variablernas beräknade osäkerhet för energianvändningen kan nu summeras med antagandet att innetemperatur, utetemperatur, solinstrålning, byggnadens specifika värmeförlustfaktor och summan personvärme, hushållsel och varmvattenbehov är oberoende av varandra. Detta ger följande beräkningsuttryck för den sökta spridningen för energianvändningen enligt BBR:

$$\sigma_{BBR} = [\ \sigma_{Einne}^{2} + \sigma_{Eute}^{2} + \sigma_{Esol}^{2} + \sigma_{EQ}^{2} + \sigma_{Eb}^{2}\ ]^{0.5} \qquad \text{(kWh)} \qquad (3.8)$$

Antalet extra beräkningar av energianvändningen för att bestämma dess osäkerhet är endast fyra med en för inne- och utetemperatur, en för solinstrålning, en för specifik värmeförlustfaktor och en för personvärme och hushållsel. Förslag till ännu mer förenkling behandlas i nästa avsnitt 4 genom att ersätta numerisk derivering med analytisk dito.

Sammanfattning av den minimala direktmetoden

En enkel sammanfattning av slutsatser om den minimala direktmetoden MDM är som följer.

- MDM kan ingå i de flesta datorprogram för beräkning av en byggnads årsenergianvändning och kräver en del programkod för att bestämma olika variablers inverkan på årsenergianvändningen. Brukaren skall inte göra några beräkningar.

- MDM beskrivs med enkla beräkningsuttryck med fyra räknesätt och kvadratrot.

- MDM kan tillämpas med olika kombinationer med och utan osäkerhet för olika variabelgrupper såsom byggdata, klimatdata och brukardata.

- MDM kan tillämpas på godtyckliga byggnader.

- MDM kan enkelt modifieras till andra krav på energianvändningar och efter nya erfarenheter om olika osäkra indata allt från byggdata, klimatdata och brukardata.

- MDM kräver att medelvärde m_i och standardavvikelse σ_i anges för osäkra variabler och motsvarande standardavvikelse σ_{Ei} för energianvändningen beräknas enligt (3.2).

- MDM beräknar energianvändningens totala standardavvikelse σ_E med en matris B och de individuella variablernas standardavvikelse σ_{Ei} enligt (3.3).

- MDM kan användas för att skatta en kvantilgräns för en godtycklig sannolikhet och för att ange sannolikheten för att en viss övre gräns inte överskrids enligt (3.4).

- MDM kan genomföras med stöd av ett Excel-ark och ett befintligt datorprogram.

- MDM kan genomföras förenklat med beräkningsuttrycken (3.1-8) och (4.40-41).

4 Analytisk direktmetod = Normal felanalys

Den tidigare omnämnda minimala direktmetoden skulle kunna förtydligas med tillägget numerisk direktmetod och även med att direktmetoden är en regelrätt tillämpning av normal felanalys.

Fördelen med numerisk derivering är att felanalys av komplicerande beräkningsmetoder inte är något problem. Nackdelen är att det i princip krävs en extra beräkning för varje extra variabel vars osäkerhet skall beaktas.

Analytisk direktmetod kräver endast en beräkning för att fastlägga medelvärdet. Den analytiska deriveringen skall tillsammans med olika variablers osäkerhet bestämma den totala osäkerheten kring det beräknade medelvärdet. Detta är en lämplig metod om hela beräkningsmetoden kan beskrivas med ett analytiskt uttryck som enkelt kan deriveras i alla sina delar och med kontinuerliga derivator. Exempel på motsatsen är styckvis definerade funktioner eller samband.

Förenklingar

Byggnaden vars energianvändning som skall beräknas är ett småhus med en enda volym. Energiberäkningen sker med en förenklad °Ch-funktion. Ventilationen sker med ett FT-system med återvinning. Någon köksfläkt ingår inte i modellen.

Värmetillskott fås från boende, hushållsel, fastighetsel och solinstrålning. Solinstrålningen är en linjär funktion av utetemperaturen. Fönstrens g-faktor har en viss osäkerhet. Endast fönster i riktning tas med för att inte överlasta framställningen. En annan förenkling är att ytterdörrar har utelämnats.

Varmvattenberedning sker med förrådsberedare. Varmhållningsförlusten en konstant effekt över året räknas in i fastighetseldelen, vilket också blir ett gratisvärmetillskott.

Byggnadens specifika värmeförlust

Byggnadens specifika värmeförlust Q med dimensionen [W/K] kan beräknas som summan av klimat-skalets, ventilationens och filtrationens specifika värmeförlust. Byggnadens klimatskal består av fem delar nämligen golv, yttervägg, fönster, tak och köldbryggor motsvarande ytor betecknas som A_g, A_y, A_f, A_t och a_k och U-värden som U_g, U_y, U_f, U_t och u_k. Den specifika värmeförlusten för transmission Q_t beräknas som:

$$Q_t = A_g\, U_g + A_y\, U_y + A_f\, U_f + A_t\, U_t + a_k\, u_k \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.1)$$

Ventilationens specifika värmeförlust Q_v med dimensionen [W/K] kan för ventilationsflöde q_v [m^3/s] och en ventilationsvärmeåtervinning med verkningsgraden v [-] beräknas som:

$$Q_v = \rho c(1-v)q_v \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.2)$$

Infiltration och exfiltration benämns i fortsättningen filtration och avser ett flöde utöver det normala ventilationsflödet som går igenom en byggnad. Filtrationens specifika värmeförlust Q_f med dimensionen [W/K] kan för filtrationsflödet q_f [m^3/s] beräknas som:

$$Q_f = \rho c q_f \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.3)$$

Byggnadens specifika värmeförlust Q med dimensionen [W/K] kan beräknas som summan av klimat-skalets, ventilationens och filtrationens specifika värmeförlust.

$$Q = Q_t + Q_v + Q_f \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.4)$$

Gratisvärmetillskott

Gratisvärmetillskott från brukare, hushållsel, fastighetsel och solinstrålning är ett väl använt begrepp även om dessa tillskott är långt från gratis. Solinstrålningen anges som är instrålning mot 1 m^2 fönster, vilket minskas med en g-faktor g_f och multipliceras med fönsterytan A_f.

Det antas här att medelsolinstrålningseffekten har räknats om till en funktion av utetemperaturen för att på ett enkelt sätt beskriva solinstrålningens variation över året. Variationen anges med termen $g_s T_u$ och termen P_{s0} är solinstrålning W/m^2 vid utetemperaturen 0 °C enligt (4.5). Konstant värmetillskott från brukare, hushållsel, fastighetsel och solinstrålning summeras till en hjälpparameter P_{g0} enligt (4.6). Det totala gratisvärmetillskottet beskrivs med (4.7).

$$P_s = P_{s0} + g_s T_u \qquad \text{(W/m}^2\text{)} \qquad (4.5)$$

$$P_{g0} = P_p + P_h + P_f + g_f A_f P_{s0} \qquad \text{(W)} \qquad (4.6)$$

$$P_g = P_{g0} + g_f A_f g_s T_u \qquad \text{(W)} \qquad (4.7)$$

Gränstemperatur för nettovärmebehov

Gränstemperaturen för nettovärmebehov för värme och ventilation T_g kan beräknas som en linjär funktion av utetemperaturen som följer:

$$T_g = T_{gn} + g_n T_u = T_i - P_g/Q \qquad \text{(°C)} \qquad (4.8)$$

Insättning av (4.6) och (4.7) i (4.8) ger efter förenkling:

$$T_{gn} =(T_i - P_{g0}/Q)/g_n \qquad \text{(°C)} \qquad (4.9)$$

$$g_n = 1 - g_f A_f g_s/Q \qquad \text{(-)} \qquad (4.10)$$

Nettovärmebehov

Nettovärmebehovet för värme och ventilation kan beräknas med den totala förlustfaktorn Q och gradtimmetabeller eller gradtimmefunktionen $G_t(T_{gn},T_{un})$ för en given gränstemperatur T_{gn} här enligt (4.9) och dito normalårstemperatur T_{un} som följer:

$$E_n = Q\, g_n\, G_t(T_{gn},T_{un}) / 1000 \qquad \text{(kWh)} \qquad (4.11)$$

Gradtimmefunktionen $G_t(T_{gn},T_{un})$ är en mer eller mindre en kvadratisk funktion och kan med antaganden om att utetemperaturens frekvensfunktion är en konstant f i intervallet (T_{min},T_{max}) skrivas som följer:

$$G_t(T_g,T_{un}) = f\,[\, T_g - T_{min}\,]^2 / 2 \qquad T_g < T_{max} \qquad \text{(°Ch)} \qquad (4.12)$$

Ett påpekande är att för $T_g > T_{max}$ är gradtimmefunktionen en linjär funktion av gränstemperaturen T_g där tillskottet över T_{max} kan skrivas som $8760\,(T_g - T_{max})$. De två temperaturgränserna och parametern f beräknas enligt nedan.

$$T_{min} = T_{un} - G_t(T_{un},T_{un}) / 2190 \qquad \text{(°C)} \qquad (4.13)$$

$$T_{max} = T_{un} + G_t(T_{un},T_{un}) / 2190 \qquad \text{(°C)} \qquad (4.14)$$

$$f = 8760 / (T_{max} - T_{min}) = 8760 \cdot 1095 / G_t(T_{un},T_{un}) \qquad \text{(h/°C)} \qquad (4.15)$$

Årsenergianvändning enligt BBR

Årsenergianvändningen enligt BBR-kravet där varmvatten och fastighetsel ingår och hushållselanvändningen inte ingår kan skrivas som:

$$E_{BBR} = [\, E_n + E_f + E_{vv}\,] / A \qquad \text{(kWh/m}^2\text{)} \qquad (4.16)$$

där

E_n	nettovärmebehov, kWh
E_f	fastighetselbehov, kWh
E_{vv}	varmvattenvärmebehov, kWh
A	golvyta, m^2

Den sökta energianvändningens osäkerhet eller känslighet för olika variabler kan beräknas som motsvarande derivator av E_{BBR} multiplicerade med samma variabels egen osäkerhet eller standardavvikelse. Detta kan skrivas som följer där notationen $\sigma(x)$ egentligen anger σ_x och inte en funktion $\sigma(x)$ av en variabel x. Detta görs för att slippa ha underunderindex i framställningen. Den sökta osäkerheten kan skrivas som (4.17) med en beroendematris B_0 och en hjälpvektor σ_0 enligt (4.18):

$$\sigma(E_{BBR}) = [\, \sigma_0^T B_0\, \sigma_0\,]^{0.5} / A \qquad \text{(kWh/m}^2\text{)} \qquad (4.17)$$

$$\sigma_0 = [\, \sigma(E_n) \quad \sigma(E_f) \quad \sigma(E_{vv})\,]^T \qquad \text{(kWh)} \qquad (4.18)$$

Osäkerhet för nettovärmebehovet

Nettoenergibehovet för uppvärmning och ventilation E_n kan med hjälp av en förenklad gradtimmefunktion skrivas som följer där f, T_{min}, Q och P_g ges av (4.15), (4.13), (4.1-4) respektive (4.5-6):

$$E_n = Q\, f\, g_n\, [\, T_i - T_{min} - P_{g0} / Q\,]^2 / 2000 \qquad \text{(kWh)} \qquad (4.19)$$

Motsvarande drifttiden för uppvärmning och ventilation för den förenklade °Ch-funktionen kan skrivas som:

$$d_n = f\, g_n\, [\, T_i - T_{min} - P_{g0} / Q\,] \qquad \text{(h)} \qquad (4.20)$$

Den sökta energianvändningens osäkerhet eller känslighet för de fem ingående variablerna kan beräknas som motsvarande derivator av E_n multiplicerade med samma variabels egen osäkerhet eller standardavvikelse. Detta kan skrivas som (4.21) med en hjälpvektor σ_1 enligt (4.22) där derivatan av y med avseende på x skrivs som dy/dx och en beroendematris B_1.

$$\sigma(E_n) = [\, \sigma_1^T\, B_1\, \sigma_1\,]^{0.5} \qquad \text{(kWh)} \qquad (4.21)$$

$$\sigma_1 = [\, dE_n / df\, \sigma(f) \quad dE_n / dQ\, \sigma(Q) \quad dE_n / dT_i\, \sigma(T_i) \quad dE_n / dT_{min}\, \sigma(T_{min}) \quad dE_n / dP_g\, \sigma(P_g)\,]^T \qquad \text{(kWh)} \qquad (4.22)$$

De fem ingående derivatorna i (4.22) kan efter förenkling och användandet av nettovärmebehovet E_n och dito driftstid d_n enligt (4.20) skrivas som:

$$dE_n/df = E_n / f \qquad \text{(kWK)} \qquad (4.23)$$

$$dE_n/dQ = [\, T_i - T_{min} + P_g / Q\,]\, d_n\, g_n / 2000 \qquad \text{(khK)} \qquad (4.24)$$

$$dE_n/dT_i = Q\, d_n\, g_n / 1000 \qquad \text{(kWh/K)} \qquad (4.25)$$

$$dE_n/dT_{min} = -\, Q\, d_n\, g_n / 1000 \qquad \text{(kWh/K)} \qquad (4.26)$$

$$dE_n/dP_g = -\, d_n\, g_n / 1000 \qquad \text{(kh)} \qquad (4.27)$$

De fem variabler kan anses vara oberoende, vilket medför att beroendematrisen B_1 blir lika med en enhetsmatris. Uttrycket (4.21) innebär därför att kvadratroten för kvadratsumman för de fem osäkerheterna beräknas.

Osäkerhet för den specifika värmeförlusten

För att kunna tillämpa (4.20) måste osäkerheten för förlustfaktorn Q och gratisvärmetillskottet P_g bestämmas. Förlustfaktorn Q är definierad av (4.1-4) och regelrätt derivering för alla tretton variabler ger motsvarande derivator. De fem första variablernas derivator berör transmissionen med avseende på ytor och kan skrivas som följer:

$$dQ/dA_g = U_g \quad (\mathrm{W/Km^2}) \qquad (4.28)$$

$$dQ/dA_y = U_y \quad (\mathrm{W/Km^2}) \qquad (4.29)$$

$$dQ/dA_t = U_t \quad (\mathrm{W/Km^2}) \qquad (4.30)$$

$$dQ/dA_f = U_f \quad (\mathrm{W/Km^2}) \qquad (4.31)$$

$$dQ/da_k = u_k \quad (\mathrm{W/Km}) \qquad (4.32)$$

De fem nästa variablernas derivator berör transmissionen med avseende på U-värden och kan skrivas som följer:

$$dQ/dU_g = A_g \quad (\mathrm{m^2}) \qquad (4.33)$$

$$dQ/dU_y = A_y \quad (\mathrm{m^2}) \qquad (4.34)$$

$$dQ/dU_t = A_t \quad (\mathrm{m^2}) \qquad (4.35)$$

$$dQ/dU_f = A_f \quad (\mathrm{m^2}) \qquad (4.36)$$

$$dQ/du_k = a_k \quad (\mathrm{m}) \qquad (4.37)$$

Det finns tre derivator för ventilationsflöde q_v, verkningsgrad v och filtrationsflöde q_f och de är som följer:

$$dQ/dq_v = \rho c(1-v) \quad (\mathrm{J/m^3}) \qquad (4.38)$$

$$dQ/dv = -\rho c q_v \quad (\mathrm{W/K}) \qquad (4.39)$$

$$dQ/dq_f = \rho c \quad (\mathrm{J/m^3}) \qquad (4.40)$$

Den totala osäkerheten $\sigma(Q)$ för värmeförlustfaktorn Q beräknas enligt (4.41) med beroendematrisen B_2 och osäkerhetsvektorn σ_2 enligt (4.42) nedan.

$$\sigma(Q) = [\, \sigma_2^T B_2 \sigma_2 \,]^{0.5} \quad (\mathrm{W/K}) \qquad (4.41)$$

$$\begin{aligned}\sigma_2 = [\, & U_g\,\sigma(A_g) \quad U_y\,\sigma(A_y) \quad U_t\,\sigma(A_t) \quad U_f\,\sigma(A_f) \quad u_k\,\sigma(a_k) \\ & A_g\,\sigma(U_g) \quad A_y\,\sigma(U_y) \quad A_t\,\sigma(U_t) \quad A_f\,\sigma(U_f) \quad a_k\,\sigma(u_k) \\ & \rho c(1-v)\,\sigma(q_v) \quad -\rho c q_v\,\sigma(v) \quad \rho c\,\sigma(q_f) \,]^T\end{aligned} \quad (\mathrm{W/K}) \qquad (4.42)$$

Osäkerheten för den specifika värmeförlusten kan uppskattas med antagande om följande relativ fel r_i *(i=1-5)* för ytor, U-värden, ventilationsluftflöde temperaturverkningsgrad och filtationsflöde. Osäkerheten för den specifika värmeförlustens olika termer enligt (4.1-4) kan efter förenkling skrivas som:

$$\sigma(Q_t) = (r_1 + r_2)\, Q_t \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.43)$$

$$\sigma(Q_v) = (r_3 + r_4)\, Q_v \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.44)$$

$$\sigma(Q_f) = r_5\, Qf \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.45)$$

$$\sigma(Q) = (r_1 + r_2)\, Q_t + (r_3 + r_4)\, Q_v + r_5\, Q_f \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.46)$$

Om de relativa osäkerheterna förhåller sig som $r = r_1 + r_2 = r_3 + r_4 = r_5$, kan osäkerheten för den specifika värmeförlusten skrivas som:

$$\sigma(Q) = r\, Q \qquad \text{(W/K)} \qquad (4.47)$$

Vad som är rimliga relativa osäkerheter kan diskuteras. Grova fel som förväxlade materialdata, förväxlade U-värden till andra konstruktioner, utförande med andra konstruktioner än projekterat, utelämnade klimatskalsytor och köldbryggor betraktas inte som rimliga fel.

Areor för ytor och längder för köldbryggor kan avrundas till närmast heltal eller närmsta högre heltal. U-värden för olika ytor kan ibland anges med tre siffrors noggrannhet och ofta med bara två siffror. Flera energiberäkningsprogram har ett urval av konstruktioner med framräknade U-värden med hög siffernoggrannhet.

Feltoleransen för ventilationsflöden är relativt sett 0.1. En mycket osäker term är filtrationen, som vid FT-ventilation är starkt beroende av byggnadens täthet, vindpåverkan och termiska tryckkrafter.

Osäkerhet för gratisvärmetillskottet

Känslighetsderivatorna för gratisvärmetillskottet med avseende på värmetillskotten personvärme, hushållsel och fastighetsel är enkla, eftersom summan av de tre ingår i gratisvärmetillskottet enligt (4.6) och kan därför skrivas som:

$$dP_g/dP_p = 1 \qquad (-) \qquad (4.48)$$

$$dP_g/dP_h = 1 \qquad (-) \qquad (4.49)$$

$$dP_g/dP_f = 1 \qquad (-) \qquad (4.50)$$

Övriga derivator med avseende på den konstanta medelsolinstrålning P_{sm} enligt (4.51), soltransmissionsfaktor g_f och fönsteryta A_f blir följande:

$$P_{sm} = P_{s0} + g_s\,(\,T_{gn} + T_{min}\,)/2 \qquad (\mathrm{W/m^2}) \qquad (4.51)$$

$$dP_g/dP_{sm} = g_f\,A_f \qquad (\mathrm{m^2}) \qquad (4.52)$$

$$dP_g/dg_f = A_f\,P_{sm} \qquad (\mathrm{W}) \qquad (4.53)$$

$$dP_g/dA_f = g_f\,P_{sm} \qquad (\mathrm{W/m^2}) \qquad (4.54)$$

Den osäkerheten $\sigma(P_g)$ för gratisvärmetillskottet P_g beräknas enligt (4.55) med beroendematrisen B_3 och osäkerhetsvektorn σ_3 enligt (4.56) nedan.

$$\sigma(P_g) = [\,\sigma_3^{\,T}\,B_3\,\sigma_3\,]^{\,0.5} \qquad (\mathrm{W}) \qquad (4.55)$$

$$\sigma_3 = [\,\sigma(P_p)\quad \sigma(P_h)\quad \sigma(P_f)\quad g_f\,A_f\,\sigma(P_{sm})\quad A_f\,P_{sm}\,\sigma(g_f)\quad g_f\,P_{sm}\,\sigma(A_f)\,]^{\,T} \qquad (\mathrm{W}) \qquad (4.56)$$

Förenkling

Beskrivning av den här redovisade analytiska direktmetoden omfattar ett stort antal beräkningsuttryck (4.16-56) för själva metoden och (4.1-15) för själva energiberäkningen. Det går att förenkla beräkningen till ett enda beräkningsuttryck för att bestämma den sökta osäkerheten $\sigma(E_{BBR})$. Detta skulle kunna göras genom att sätta samman (4.17-18) med (4.21-22), (4.41-42) och (4.55-56), men resultat blir något otympligt.

En enklare framställning blir det om osäkerheten $\sigma(Q)$ för den specifika värmeförlusten Q och osäkerheten $\sigma(P_g)$ för gratisvärmetillskottet P_g räknas fram med (4.40-41) respektive (4.55-56) var för sig. De fyra derivatorna (4.24-27) kan förenklas genom att införa en hjälpparameter a innehållande drifttiden d_n enligt (4.20) och korrektionsfaktorn g_n enligt (4.10) som:

$$a = d_n\,g_n\,/\,1000 \qquad (\mathrm{kh}) \qquad (4.57)$$

Uteklimatets osäkerhet förenklas till att bara gälla parametern T_{min} som kan beskriva en osäker årsmedeltemperatur, medan inverkan från parametern f försummas. Detta gör att (4.22) kan skrivas om till en vektor σ_4 med fyra element:

$$\sigma_4 = a\,[\,T\,\sigma(Q)\quad Q\,\sigma(T_i)\quad -Q\,\sigma(T_{min})\quad -\sigma(P_g)\,]^{\,T} \qquad (\mathrm{kWh}) \qquad (4.58)$$

där temperaturparametern T ges av (4.59) nedan.

$$T = (\,T_i - T_{min} + P_{g0}\,/\,Q\,)\,/\,2 \qquad (\mathrm{K}) \qquad (4.59)$$

Om alla ingående osäkerheter antas vara oberoende, vilket är rimligt bortsett från kopplingen mellan personvärme, hushållel och varmvattenbehov. Denna koppling är långt från fullständig som att en fördubblad personvärme medför en fördubblad hushållselanvändning och en fördubblad varmvattenanvändning. Förenklingen medför att osäkerheten överskattas något, eftersom en högre varmvattenförbrukning med en viss koppling motverkas av en lägre nettovärmeanvändning, vilken minskas av högre personvärme och hushållsel.

Fastighetselbehovet är en term som kan försummas, eftersom den är liten och dess osäkerhet är liten i förhållande till andra termers bidrag till osäkerheten. Det återstår endast fem osäkerheter för klimatskalet, inne- och utetemperatur, gratisvärmetillskott och varmvatten.

Det sökta uttrycket för energianvändningens osäkerhet blir en funktion av fem oberoende osäkerheter för den specifika värmeförlusten $\sigma(Q)$, innetemperaturen $\sigma(T_i)$, utetemperaturen $\sigma(T_{min})$, gratisvärmetillskottet $\sigma(P_g)$ och varmvattenbehovet $\sigma(E_{vv})$ samt parametrarna a enligt (4.57), innetemperaturen T_i, lägsta utetemperatur T_{min} enligt (4.13), gratisvärmetillskottet P_{g0} enligt (4.6), värmeförlusten Q enligt (4.1-4) och temperaturparametern T enligt (4.59):

$$\sigma(E_{BBR}) = [\ \sigma_5^T\ \sigma_5\ ]^{0.5} / A \qquad (\text{kWh/m}^2) \qquad (4.60)$$

$$\sigma_5 = \begin{bmatrix} T\,a\,\sigma(Q) \\ Q\,a\,\sigma(T_i) \\ -\,Q\,a\,\sigma(T_{min}) \\ -\,a\,\sigma(P_g) \\ \sigma(E_{vv}) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{(specifik värmeförlust)} \\ \text{(innetemperatur)} \\ \text{(utetemperatur)} \\ \text{(gratisvärmetillskott)} \\ \text{(varmvatten)} \end{array} \qquad (\text{kWh}) \qquad (4.61)$$

Beräkningsuttrycket (4.61) för osäkerhetsvektorn ser enkelt ut, men en anmärkning är att osäkerheten för den specifika värmeförlusten enligt (4.41-42) och osäkerheten för gratisvärmetillskottet enligt (4.55-56) kräver betydligt med beräkningsarbete än själva (4.60-61). Det tre osäkerheterna för innetemperaturen $\sigma(T_i)$, utetemperaturen $\sigma(T_{min})$ och varmvattenbehovet $\sigma(E_{vv})$ behöver inte beräknas utan är givna värden.

Vad som resterar att för bestämma σ_5 enligt (4.61) är temperaturparametern T enligt (4.59), hjälpparametern a enligt (4.57) och den specifika värmeförlusten Q enligt (4.1-4). Hjälpparametern a beräknas med drifttiden d_n enligt (4.20) och korrektionsfaktorn g_n enligt (4.10).

Tillägg om värmepumpar

En viktig anmärkning att den redovisade metoden inte alls behandlar värmepumpar som kan användas för uppvärmning, ventilation och varmvattenberedning. Det går att utveckla denna analytiska direktmetod för att även gälla för värmepumpar, men den numeriska direktmetoden från avsnitt 3 kan användas istället.

En grov metod med antagande om konstant värmefaktor η med osäkerheten $\sigma(\eta)$ är att dividera nettovärmebehov E_n, varmvattenbehov E_{vv} och osäkerheten enligt (4.61) med värmefaktorn η för att beräkna medelvärdet m_E och osäkerheten enligt (4.61), vilken utökas med ett sjätte element $(E_n + E_{vv})\ \sigma(\eta) / \eta^2$ för värmepumpens värmefaktors osäkerhet $\sigma(\eta)$ oberoende av övriga element.

Ytterligare förenkling

Osäkerhetsvektorn enligt (4.61) kan förenklas från fem element till tre element genom att osäkerheterna för innetemperaturen $\sigma(T_i)$, utetemperaturen $\sigma(T_{min})$ och gratisvärmetillskott $\sigma(P_g)$ bildar en osäkerhet $\sigma(\Delta T)$ för skillnaden mellan gränstemperaturen för uppvärmning i princip $T_i - P_g/Q$ och utetemperaturen T_{min}. Förenklingen av (4.61) och osäkerheten $\sigma(\Delta T)$ kan beräknas som:

$$\sigma_5 = [\ T\ a\ \sigma(Q) \quad \text{(specifik värmeförlust)}$$
$$Q\ a\ \sigma(\Delta T) \quad \text{(temperaturskillnad)}$$
$$\sigma(E_{vv})\ ] \quad \text{(varmvatten)} \qquad \text{(kWh)} \qquad (4.62)$$

$$\sigma(\Delta T) = [\ \sigma(T_i)^2 + \sigma(T_{min})^2 + \sigma(P_g)^2/Q^2\ ]^{0.5} \qquad \text{(kWh)} \qquad (4.63)$$

Osäkerhet för golvyta

Osäkerheten för golvytan oberoende av övriga osäkerheter kan tas med för att beräkna osäkerheten för energianvändningen enligt (4.60). Derivering med avseende på golvarean A med osäkerheten $\sigma(A)$ ger efter förenkling ett utökat uttryck för (4.60) med en extra faktor för golvareans osäkerhet $[\ 1 + \sigma(A)^2 / A^2\ ]^{0.5}$ på formen:

$$\sigma(E_{BBR}) = [\ 1 + \sigma(A)^2 / A^2\ ]^{0.5}\ [\ \sigma_5^T\ \sigma_5\ ]^{0.5} / A \qquad (\text{kWh/m}^2) \qquad (4.64)$$

Den extra faktorn för golvareans osäkerhet $[\ 1 + \sigma(A)^2 / A^2\ ]^{0.5}$ kan för små relativa fel förenklas till $[\ 1 + \sigma(A)^2 / 2\ A^2\ ]$. Om det relativa felet är mindre än 0.1, blir den extra faktorn högst 1.005. Detta visar att osäkerheten för golvarean blir försumbar.

Utetemperaturberoende innetemperatur

Innetemperaturen har antagits vara konstant, men innetemperaturen kan tillåtas vara en linjär funktion av utetemperaturen på formen:

$$T_i = T_{i0} + g_i\ T_u \qquad (°\text{C}) \qquad (4.65)$$

Detta påverkar gränstemperaturen T_{gn} och korrektionsfaktorn g_n enligt de tidigare uttrycken (4.9-10), vilka nu skall ersättas med:

$$T_{gn} = (\ T_{i0} - P_{g0}/Q)/g_n \qquad (°\text{C}) \qquad (4.66)$$

$$g_n = 1 + g_i - g_f\ A_f\ g_s/Q \qquad (-) \qquad (4.67)$$

Korrektionsfaktorn g_n ingår i driftiden d_n enligt (4.20) och hjälpparametern a enligt (4.57).

Uppsummering

Den sökta osäkerheten för energianvändning enligt BBR kan för normala byggnader beräknas med normal felanalys som visats i detta avsnitt sammanfattat med uttryck (4.60-61), men inte byggnader med extremt låg energiförbrukning med ett mycket osäkert nettovärmebehov. Nettovärmebehovet är skillnaden mellan två något osäkra tal, nämligen bruttovärmebehovet och gratisvärmetillskottet. Resultatet blir därför mycket osäkert. Den framräknade osäkerheten σ_E enligt (4.60) kan blir större än medelvärdet m_E.

Felanalys av ett uppmätt eller beräknat värde bygger på att linjärisera den funktion som beskriver värdet med avseende på olika osäkra variabler för att kunna bedöma deras inverkan på värdets osäkerhet. Linjäriseringen gäller endast för mindre ändringar eller osäkerheter för de olika variablerna om funktionen är olinjär.

Den sökta gränsen för energianvändningen ligger omkring en standardavvikelse högre än medelvärdet, vilket en linjärisering kan beskriva godtagbart. Mera exakt ligger gränsen 0.84 och 1.28 standardavvikelser högre än medelvärdet för sannolikheten 0.8 respektive 0.9 att utfallet ligger under gränsen.

Detta kan jämföras med brottsannolikhet för olika konstruktioner med värden 10^{-6} och 10^{-9}, som innebär att brottgränsen ligger 4.75 respektive 6.00 standardavvikelser från medelvärdet för ett normalfördelat fall. Felanalys med hjälp av en linjäriserad funktion kan knappast användas i detta fall, eftersom linjäriseringen endast gäller nära medelvärdet.

Uttrycket (4.61) visar direkt hur olika osäkerheter skall viktas samman. Varje element består av en produkt mellan en känslighetsderivata för aktuell variabel och variabelns osäkerhet. Det kan inte bli tydligare och enklare.

Der går också att förenkla beräkningsuttrycken (4.60-61) genom att slå samman osäkerheterna för innetemperatur, utetemperatur och gratisvärmetillskott, vilket visas med uttrycken (4.62-63). Gratisvärmetillskottets osäkerhet räknas om till en osäkerhet i temperatur genom division med den specifika värmeförlusten. Den sökta osäkerheten består av osäkerheten för byggnaden, för klimatet och boendet samt för varmvatten. Enklare kan det inte bli.

En sista avslutande slutsats är att normal felanalys är välkänd, allmängiltig, tillräcklig, enkel och informativ samt att någon utveckling av säkerhetsfaktorer därför inte behövs.

Metoden med partialkoefficienter har testats för att dimensionera dörrar för utrymning av stora samlingssalar vid brand utan framgång beroende på att det inte gick att beskriva olika sannolikhetsfunktioner.