

BYGGENTREPRENÖRENS ENERGISIGNATUR

Sofia Lidelöw, Avd. för Byggkonstruktion och -produktion, Luleå tekniska universitet

Kajsa Flodberg Munck, NCC Teknik och Hållbar utveckling

2015-09-11

Förord

Föreliggande rapport är resultatet av ett projektsamarbete mellan NCC Construction Sverige AB och Luleå tekniska universitet om en metod för att via mätning av en byggnads energisignatur uppskatta en byggnads energiprestanda.

Projektet har genomförts av Sofia Lidelöw, LTU och Kajsa Flodberg Munck, NCC, i dialog med projektets referensgrupp. Ett varmt tack till medlemmar i projektets referensgrupp som delgivit synpunkter och idéer under projektets gång.

Referensgruppen har bestått av Björn Berggren (Skanska Teknik), Kjell-Åke Henriksson, (JM), Helena Lidelöw (Lindbäcks Bygg), Thomas Olofsson (Umeå Universitet), Eje Sandberg (ATON Teknikkonsult), Jan-Ulric Sjögren (Stockholms Stad) och Svante Wijk (NCC Construction Sverige).

Vi vill tacka Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) för finansiering av projektet.

Författarna

Luleå och Malmö, september 2015

Sammanfattning

Det gängse måttet på en byggnads energiprestanda, kWh/m²,år för uppvärmning, tappvarmvatten och fastighetsel, beskriver en del av byggnadens totala energianvändning som ofta bestäms utifrån schablonmässiga antaganden om t.ex. inom- och utomhustemperaturer och brukarnas energianvändning. Måttets storlek påverkas inte bara av byggnadens förmåga att hushålla med energi utan även av i hög grad av brukar- och driftbeteenden. Det blir med detta mått också svårt att dra gränsen mellan bygg- och installationsentreprenörernas ansvarsområden och brukarnas inverkan.

Detta arbete handlar om en annan, kompletterande metod att uppskatta en byggnads energiprestanda som fokuserar på byggentreprenörens ansvarsområde, dvs. prestandan hos själva byggnaden och dess klimatskal oberoende av temperaturvariationer och byggnadens användning. Metoden innebär att byggnadens energisignatur analyseras, där energisignaturen bestäms utifrån mätningar av använd värmeeffekt för uppvärmning som funktion av temperaturskillnaden över klimatskalet under den mörka, kalla vinterperioden. Det är teoretiskt möjligt att med metoden ta fram både ett mått på byggnadens totala värmeförlustfaktor, dvs. värmeförluster via klimatskal och ventilation, och ett separat värmeförlustmått för klimatskalet i form av transmissionsförluster (inklusive luftläckage).

Projektets mål var att bidra till en vidareutveckling av energisignaturmetoden genom att:

- Ta fram en detaljerad beskrivning av de mätningar och analyser som metoden kräver så att en byggentreprenör har möjlighet använda metoden och ta fram avsett resultat.
- Testa metodens tillämpbarhet på lågenergihus genom att identifiera och analysera energisignaturen för tre utformningsmässigt identiska passivhusvillor med FTX och ett flerbostadshus med FVP. En förutsättning för projektet var att inga nya mätningar skulle utföras utan undersökningarna utgick från befintliga mätdata för byggnaderna.

Separat bestämning av ett värmeförlustmått för klimatskalet kräver tillgång till mätdata för tilluftsflöde och -temperaturer, vilket fanns för villorna. För flerbostadshuset kunde endast total värmeförlustfaktor bestämmas. Metoden gav robusta uppskattningar av värmeförlustmått för båda lågenergihus typer med medelfel ner till 3%. Robustheten i uppskattningarna påverkades av val av mätperiod och metod för förbehandling samt tillgången till data.

För att erhålla robusta uppskattningar användes mätdata från den mörkaste vinterperioden (1,5 till max. 4 månader i anslutning till vintersolståndet) för att eliminera solens bidrag och mätdata förbehandlades för att reducera inverkan från värmelagring. Jämförelser av olika förbehandlingsmetoder visade att glidande medelvärdesbildning gav en betydligt säkrare bestämning av värmeförlustmått än traditionell medelvärdesbildning. En metod för parning av data befanns vara ett effektivt alternativ för längre mätperioder (3-4 månader runt vintersolståndet) där solens bidrag inte helt kunde försummas.

Metodens tillämpning på lågenergihus kräver hög tidsupplösning på mätdata. Resultaten indikerar t.ex. att det inte är tillräckligt med månadsvärden för hushållsel eftersom det introducerar osäkerheter i uppskattade värmeförlustmått. Detta blev uppenbart för

passivhusvillorna där spillvärme från hushållsel tillgodoser en relativt sett stor andel av värmebehovet. Tillgång till relevanta och spårbara mätdata, särskilt mätdata som kräver brukarnas medgivande, begränsar därmed möjligheterna att använda metoden på byggnader som endast följts upp enligt Svebys rekommendationer.

Behov av fortsatta studier har identifierats avseende huruvida uttorkning av byggfukt kan förändra energisignaturen, och därmed värmeförlustmåten, för en ny byggnad över tid. Eftersom resultaten indikerar att både brukar- och driftbeteenden kan ha en indirekt påverkan på de från energisignaturen uppskattade värmeförlustmåten för lågenergihus föreslås fördjupade studier avseende hur mycket detaljeringsgraden på data för brukar- och driftbeteenden kan påverka resultaten.

Med tillgång till relevanta mätdata kan metoden användas för att uppskatta klimatskalets effektiva U-värde (inkluderande transmissionsförluster och okontrollerat luftläckage mot uteluft). På så sätt är det möjligt att särskilja byggtreprenörens ansvarsområde från installationsentreprenörens när det gäller en byggnads energiprestanda. Den har därmed potential att utgöra ett komplement till gängse uppföljningar enligt Sveby som är tillämpligt för både äldre, mindre energieffektiva hus och lågenergihus. Vidare studier rekommenderas för att bygga erfarenhet av metodens praktiska tillämpning för olika typer av hus och brukare. Föreliggande rapport kan där användas som stöd vid insamling och analys av mätdata.

Innehållsförteckning

FÖRORD	3
SAMMANFATTNING	5
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	7
1. INLEDNING	9
2. SYFTE, MÅL OCH GENOMFÖRANDE	9
3. BESKRIVNING AV UNDERSÖKTA LÅGENERGIHUS	10
3.1 Villor med FTX	10
3.2 Flerbostadshus med FVP.....	11
4. METODBESKRIVNING	11
5. TILLGÄNGLIGA MÄTDATA OCH GJORDA ANTAGANDEN	14
5.1 Villor med FTX	14
5.2 Flerbostadshus med FVP.....	18
6. RESULTAT OCH ANALYS	22
6.1 Villor med FTX	22
6.2 Flerbostadshus med FVP.....	30
6.3 Sammanfattning av analyserade resultat.....	36
7. DISKUSSION OCH SLUTSATSER	38
7.1 Metodens robusthet (precision)	38
7.2 Metodens praktiska tillämpning.....	40
LITTERATURFÖRTECKNING	43
BILAGA A: METODBESKRIVNING BYGGENTREPRENÖRENS ENERGISIGNATUR	

1. Inledning

En byggnads energieffektivitet byggs upp av klimatskalet och de installationer som finns i byggnaden till ungefär lika delar. Brukarbeteendet påverkar också. Det är vanligt att det är två olika aktörer som ansvarar för leveransen av klimatskal resp. installationssystem. De flesta certifierings- och värderingssystem som används idag är dock uppbyggda på att byggnaden, med dess tekniska installationer och brukarnas beteenden bedöms som en helhet. Detta är helt riktigt i förhållande till samhälle och beställare. Det blir dock svårt att dra gränsen mellan ansvarsområdena mellan entreprenörerna för klimatskal och installationer.

En byggnads energiprestanda anges oftast enligt BBRs definition som energianvändning per uppvärmd areaenhet. Problemet med detta mått är att det i hög grad avspeglar brukarbeteenden och fastighetsförvaltning. Därför utvecklade Andersson et al. (2010) i ett CERBOF/SBUF-projekt en kompletterande metod som fokuserar på det som entreprenörerna kan och ska ansvara för, dvs. prestandan hos byggnaden och dess tekniska installationer. Metoden innebär att byggnadens energisignatur analyseras, där energisignaturen bestäms utifrån mätningar av använd värmeeffekt för uppvärmning som funktion av temperaturskillnaden över klimatskalet under den mörka, kalla vinterperioden. Tidigare studier (t.ex. Andersson et al. 2010; Nordström et al. 2012, Vesterberg 2014) har visat att metoden kan användas för att bestämma centrala värmeförlustmått såsom byggnadens totala värmeförlustfaktor (inkluderande transmissions- och ventilationsförluster) respektive byggnadens transmissionsförluster (inkluderande okontrollerat luftläckage) som båda beskriver byggnadens energiprestanda oberoende av brukaren. Den är därför en möjlig metod att använda för att opartiskt verifiera kvaliteten på det levererade klimatskalet. Dock behöver metoden vidare-utvecklas för att prestandan för klimatskalet ska kunna analyseras oberoende av installationer som värmepumpar och system för värmeåtervinning, vilket är nödvändigt för att kunna tillämpa metoden på lågenergihus.

2. Syfte, mål och genomförande

Syftet är att ta fram en metod för att via mätning av en byggnads energisignatur säkerställa att byggentreprenören levererat det som utlovats för klimatskalet.

Målsättningen med projektet var att bidra till en vidareutveckling av energisignaturmetoden så att den kan tillämpas på lågenergihus med värmeåtervinningssystem som från- och tilluftsventilation med värmeåtervinning (FTX) eller frånluftsvärmepump (FVP) genom att:

- Ta fram en detaljerad beskrivning av de mätningar och analyser som metoden kräver så att en byggentreprenör har möjlighet använda metoden och ta fram avsett resultat. Metodbeskrivningen bifogas rapporten som Bilaga A.
- Testa metodens tillämpbarhet genom att identifiera och analysera energisignaturen för två lågenergihus. För att erhålla en spridning avseende typ av lågenergihus valde vi att testa metoden på tre utformningsmässigt identiska passivhusvillor med FTX och ett flerbostadshus med FVP. En förutsättning för projektet var att inga nya mätningar

skulle utföras utan undersökningarna skulle utgå från befintliga mätdata för byggnaderna. Resultaten från undersökningen presenteras i rapportens huvuddel.

Arbetet genomfördes under perioden juni 2014 till och med augusti 2015.

3. Beskrivning av undersökta lågenergihus

Tre villor med FTX-system samt ett flerbostadshus med frånluftsvärmepump har undersökts i projektet. Inga nya mätningar har gjorts i detta projekt utan lågenergihus med befintlig mätdata har valts ut med hjälp av referensgruppen.

3.1 Villor med FTX

De tre studerade villorna, som är projekterade som passivhus, ligger i ett område i sydvästra Sverige och stod färdiga vid årsskiftet 2012/2013. Villorna är identiska till utformningen men lokaliserade i olika väderstreck. Villorna är friliggande enbostadshus i två plan med totalt 140 m² uppvärmd boyta (A_{temp}). De har en kompakt, kubisk form samt ett välisolerat och lufttätt klimatskal. Klimatskalets genomsnittliga värmeomgångskoefficient (U_m) har beräknats till 0,17 W/m²,K. (inkl. markens värmemotstånd) och luftläckaget är uppmätt till 0,06-0,08 l/s,m² omslutande area vid 50 Pa tryckskillnad. Stommen består av en lätt träregelkonstruktion.

Byggnadernas ventilationssystem är av typen FTX, med roterande värmeväxlare med temperaturverkningsgrader uppmätta till 73-76% på årsmedelbasis. I aggregaten finns ett fjärrvärmekopplat värmebatteri som vid behov används för att eftervärma tilluften till önskad temperatur. Villornas värmesystem består av en tappvarmvattenslinga som levereras i kulvert från en fristående och närliggande fjärrvärmeundercentral. En del av varmvattnet tappas ur i kran, medan resten går till uppvärmning genom en värmeväxlare som är kopplad till värmebatteriet i ventilationsaggregatet. Efter värmeväxlaren passerar returen genom en golvvärmslinga i badrummet för att sedan gå tillbaka till undercentralen. I varmvattenslingan finns ett konstant flöde, eftersom varmvatten till kranen måste gå att få när den boende så önskar.

Energisystemlösningar, energiprestanda och inomhusklimat i villorna har följts upp och utvärderas av byggherren och byggentreprenören. Mätningarna omfattar energianvändning samt inomhus- och aggregattemperaturer i de tre villorna och utomhustemperatur och globalstrålning i området. För projektet tillgängliga mätdata beskrivs i kapitel 5.

Uppmätt normalårskorrigerad specifik energianvändning i villorna år 2013/2014 var 53 kWh/m²,år för Hus 1, 38 kWh/m²,år för Hus 2 och 57 kWh/m²,år för Hus 3. Den främsta skillnaden är att tappvarmvattenanvändningen i Hus 2 var betydligt lägre än i Hus 1 och 3 under mätperioden. Hushållselens medelvärde 2013 var 33 kWh/m²,år för samtliga hus i området men det framgår av mer detaljerad mätdata att elanvändningen var högre i Hus 2 än i Hus 1 och 3 under själva uppvärmningssäsongen, vilket kan ha bidragit till ett lägre värmebehov. Det går inte att se att orienteringen av de tre villorna har någon större inverkan på värmebehovet då det är ungefär lika stora glasytor på norr- och söderfasad samt på öst- och västfasad. Dessutom är Hus 1 och Hus 2 mest lika i orientering trots att skillnaden i specifik energianvändning är stor.

3.2 Flerbostadshus med FVP

Det studerade flerbostadshuset ligger i sydöstra Sverige och stod färdigt i januari 2012. Huset är ett flerfamiljshus i form av ett kompakt punkthus med totalt 1319 m² uppvärmd boyta (A_{temp}) fördelat på fyra våningar med fyra lägenheter på varje våning. Huset har en tung stomme med betongsandwichväggar. Klimatskalets genomsnittliga värmegenomgångskoefficient (U_m) har beräknats till 0,39 W/m²,K (inkl. markens värmemotstånd). Luftläckaget genom klimatskalet är inte uppmätt men har erfarenhetsmässigt uppskattats till 0,3-0,5 l/s,m² i projekteringsskedet.

Flerbostadshuset har mekanisk frånluftsventilation med en central frånluftsvärmepump (FVP) som spetsas med fjärrvärme och värmer en vattenburen radiatorkrets. Tappvarmvattnet värms med fjärrvärme enbart.

Mätningarna i flerfamiljshuset omfattar inomhustemperatur (uppmätt i gemensam frånluftskanal), utomhustemperatur, avgiven värme från värmepump, tillförd el till värmepump, använd fjärrvärme för varmvatten (exklusive VVC) och total fjärrvärmeanvändning. För projektet tillgängliga mätdata beskrivs i kapitel 5.

4. Metodbeskrivning

Energisignaturer har länge framgångsrikt använts för att genom mätning verifiera och jämföra byggnaders energiprestanda, se t.ex. Hammarsten (1987) och Sjögren et al. (2009). De inkluderar normalårskorrigerings, vilket medger jämförelser över tid, t.ex. före och efter renovering eller andra ändringar. I Svebys mätföreskrifter (Sveby 2012b) är energisignatur en av metoderna som rekommenderas för normalårskorrigerings av värme- och kylbehov.

I sin enklaste form baseras bestämningen av en byggnads energisignatur på månadsvärden för köpt energi och utomhustemperatur. Ett problem med denna enkla metod är att framförallt solinstrålningen, elanvändningen och värmelagringen i huset varierar över tid och efter säsong, vilket resulterar i varierande energisignaturer. En sådan förenklad metod är heller inte lämplig att använda för hus med låga nettovärmebehov (lågenergihus) eftersom värmeförlusterna från t.ex. solinstrålning, värmelagring, personer och spillvärme från elanvändning, som då inte beaktas, står för en betydande andel av uppvärmningen i lågenergihus. I standarden SS24300-1:2011 beskrivs en alternativ metod för att via mätning bestämma en byggnads effektsignatur baserad på veckomedelvärden för inom- och utomhustemperatur samt tillförd värmeeffekt, men inte heller denna metod är tillämpbar på lågenergihus eftersom den bortser från inverkan av solinstrålning och variationer i spillvärme från elanvändning.

En utvecklad metod där den totala värmeeffekt som används för att vidmakthålla en viss temperaturskillnad över klimatskalet mäts över tid har utvecklats och använts av Sjögren et al. (2009) och Andersson et al. (2010). Metoden innebär att byggnadens totala värmeförlustfaktor, dvs. transmissions- och ventilationsförluster (som mäts i W/K), bestäms som lutningen för erhållen punktmängd i effekt-temperaturkurvan med enkel linjär regression. Utgångspunkten för att med denna metod bestämma en byggnads energisignatur är en

effektbalans för byggnaden, där de huvudsakliga förenklingarna består i att inverkan från vind och luftens fuktighet ej beaktas:

$$P_v + \alpha P_{el} + \beta P_{vv} + P_p + P_{lb} + P_{sol} - F(T_i - T_e) - P_M = P_{dyn} \quad (1)$$

där

- P_v Använd effekt för uppvärmning via värmesystem
- αP_{el} Använd effekt för uppvärmning via elektricitet (α anger nyttjandegrad av totalt använd effekt för drift- och hushållsel, P_{el})
- βP_{vv} Använd effekt för uppvärmning via varmvattenberedning, -distribution och – användning (β anger nyttjandegrad av totalt använd effekt för varmvatten, P_{vv})
- P_p Nyttiggjord värmeeffekt från personer
- P_{lb} Använd effekt för uppvärmning via värmebatteri i luftbehandlingsaggregat
- P_{sol} Nyttiggjord värmeeffekt från solinstrålning
- F Total värmeförlustfaktor inkl. transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft
- T_i Inomhustemperatur
- T_e Utomhustemperatur
- P_M Värmeförlust till mark
- P_{dyn} Nyttiggjord värme från värmelagring

Genom att använda mätdata från perioder i anslutning till vintersolståndet för att minimera solinstrålningens bidrag till uppvärmning (dvs. P_{sol} lika med noll) och förbehandla mätdata för att minimera värmelagringens bidrag (dvs. P_{dyn} lika med noll) kan ekv. 1 förenklas till:

$$P_v + \alpha P_{el} + \beta P_{vv} + P_p + P_{lb} = F(T_i - T_e) + P_M \quad (2)$$

Om parametrarna på vänster sida i ekv. 2 samt temperaturskillnaden mellan inne- och uteluft ($T_i - T_e$) är kända kan F och P_M uppskattas genom linjär regression under antagandet att P_M är relativt konstant under den analyserade tidsperioden. Metoden har använts av Sjögren et al. (2009) och Andersson et al. (2010) för att analysera hus utan värmåtervinning (där P_{lb} är lika med noll). Vesterberg (2014) vidareutvecklade metoden genom att separera den totala värmeförlustfaktorn F i två komponenter där den ena komponenten beskriver transmissionsförluster, inklusive luftläckage, mot uteluft och den andra komponenten representerar ventilationsförluster:

$$F(T_i - T_e) = UA_t(T_i - T_e) + Q_f \rho C_p (T_i - T_e) \quad (3)$$

där

- UA_t Transmissionsförlust (U och A anger genomsnittligt U -värde respektive sammanlagd omslutande area för klimatskalet mot uteluft, ovan jord)
- $Q_f \rho C_p$ Ventilationsförlust (Q_f anger frånluftsflödet, ρ luftens densitet och C_p luftens specifika värmekapacitet)

För ett hus med ett mekaniskt från- och tilluftsflöde balanseras frånluftsflödet Q_f av tilluftsflödet och luftläckageflödet via ofrivilligt luftläckage genom klimatskalet, dvs. ventilationsförlusten kan beskrivas som:

$$Q_f \rho C_p (T_i - T_e) = Q_t \rho C_p (T_i - T_e) + Q_L \rho C_p (T_i - T_e) \quad (4)$$

där

Q_t Tilluftsflöde via husets ventilationssystem

Q_L Luftläckageflöde genom husets klimatskal

För ett hus med värmeåtervinning ur frånluften via FTX eller FVP som utnyttjar värmen i frånluften för värmning av tilluft kan ekv. 4 vidareutvecklas till:

$$Q_f \rho C_p (T_i - T_e) = Q_t \rho C_p (T_t - T_x) + Q_t \rho C_p (T_i - T_t) + Q_L \rho C_p (T_i - T_e) \quad (5)$$

där

T_t Tilluftstemperatur efter ev. värmebatteri

T_x Tilluftstemperatur efter värmväxlaren eller värmepumpen men före ev. värmebatteri

Den första termen i ekv. 5 beskriver värmetilskottet från det värmebatteri som vid behov används om luftens temperatur efter värmväxlaren eller värmepumpen (T_x) är lägre än den önskade tilluftstemperaturen (T_t). Den andra termen beskriver den värmetransport som sker då tilluftstemperaturen konvergerar till inomhustemperaturen. Den tredje termen beskriver det värmetilskott som behövs för att värma luftläckageflödet från utomhus- till inomhustemperatur.

Effektbalansen enligt ekv. 2 kan med hjälp av ekv. 3 och ekv. 5 utvecklas till:

$$P_v + \alpha P_{el} + \beta P_{vv} + P_p + P_{lb} = (UA_t + Q_L \rho C_p) * (T_i - T_e) + Q_t \rho C_p ((T_t - T_x) + (T_i - T_t)) + P_M \quad (6)$$

Eftersom P_{lb} motsvarar den första termen i ekv. 5, dvs. $P_{lb} = Q_t \rho C_p (T_t - T_x)$ kan ekv. 6 förenklas till:

$$P_v + \alpha P_{el} + \beta P_{vv} + P_p - Q_t \rho C_p * (T_i - T_t) = (UA_t + Q_L \rho C_p) * (T_i - T_e) + P_M \quad (7)$$

Om parametrarna på vänster sida i ekv. 7 samt temperaturskillnaden mellan inne- och uteluft ($T_i - T_e$) är kända kan transmissionsförluster inklusive luftläckageförluster mot uteluften ($UA_t + Q_L \rho C_p$), samt markförlusten P_M uppskattas genom en linjär regression av ekv. 7 under antagandet att P_M är relativt konstant under den analyserade tidsperioden. Metoden har använts av Vesterberg (2014) för att analysera hus med FTX.

5. Tillgängliga mätdata och gjorda antaganden

5.1 Villor med FTX

Tillgängliga mätdata för villorna härrör från perioden 2013-09-01 till och med 2014-02-04. Bortfallet var endast mätvärden för enstaka timmar (totalt 17 h) under december och januari. Eftersom mätningar för luftflöde och temperaturer i FTX-aggregaten fanns tillgängliga togs ekv. 7, tillsammans med antagandet om att bidragen från solinstrålning (P_{sol}) och värmelagring (P_{dyn}) kan försummas, som utgångspunkt för bestämning av värmeförluster via transmission inklusive luftläckage mot uteluft ($UA_t + Q_{Lp}C_p$). Mätningar och gjorda antaganden för parametrarna i ekv. 7 samt för P_{sol} och P_{dyn} beskrivs i kapitel 5.1.1-10.

5.1.1 Tillförd värmeeffekt via värmesystemet (P_v)

Tillförd värmeeffekt bestämdes utifrån uppmätt temperaturdifferens på ingående och utgående flöde i varmvattenslingan samt uppmätt flöde och volym vid utloppet, efter uttag av tappvarmvatten, i respektive villa. Den uppmätta värmeeffekten inkluderar därmed avgiven värme från den konstanta varmvattencirkulationen i ledningar och via golvvärme i badrum.

5.1.2 Nyttiggjord värmeeffekt från elanvändning (αP_{el})

Elanvändningen, som består av både hushållsel och driftel, sker i huvudsak innanför klimatskalet då ingen motorvärmare eller andra större ellaster finns utomhus. Uppmätt total elanvändning per månad i respektive villa erhöles via nätägaren. Användningen av driftel, som i huvudsak utgörs av el till FTX-aggregatet och i viss mån el till pumpen som vid behov pumpar varmvatten till värmebatteriet, mättes med separat elmätare i respektive villa och loggades varje timme. Hushållelanvändningen beräknades genom att från uppmätt total elanvändning subtrahera uppmätt driftelanvändning.

Eftersom endast månadsvärden för totalel fanns tillgängliga fördelades den beräknade hushållelanvändningen ut per dygn utifrån statistiska data på hur hushållelanvändningen för boende i flerbostadshus varierar mellan olika veckodagar (Bagge et al. 2012, s. 24-26).

Nyttjandegraden α för hushållsel antogs till 80% i enlighet med Febys schablon för spillvärme från hushållsel då spiskåpan ej är ansluten till värmeåtervinningsystem (Feby 2009, s. 12).

Nyttjandegraden α för driftel antogs till 0% i enlighet med Febys rekommendation för spillvärme från fläktel då fläktmotorn sitter efter värmeväxlaren (Feby 2009, s. 12). Spillvärme från användningen av el för drift av pumpen till värmebatteriet bortsågs ifrån.

5.1.3 Nyttiggjord värmeeffekt från varmvatten (βP_{vv})

Bidraget från varmvatten till uppvärmning, βP_{vv} , antogs motsvara värmeförlusten i varmvattenslingan, vilken inkluderas i P_v . Den i övrigt avgivna värmen från varmvatten

antogs motsvara värmeförlusten som sker när kallt vatten värms och förs bort från huset med spillvatten. Det sker ingen varmvattenberedning som kan bidra till uppvärmning i villorna.

5.1.4 Nyttiggjord värmeeffekt från personvärme (P_p)

Bidraget från personvärme till husets uppvärmning är beroende av antalet personer och deras vistelsetid innanför klimatskalet, aktivitet och storlek. För personvärmen antogs en värmeavgivning om 80W per person i enlighet med Svebys schablon (Sveby 2012a, s. 27-28). Antalet boende i respektive villa under mätperioden är känt, men däremot inte de boendes vistelsetider som antogs motsvara Svebys schablon om 14 h/dygn (Sveby 2012a, s. 27-28).

5.1.5 Tilluftsflöde och -temperatur (Q_t och T_t)

Tilluftsflödet uppmättes i samband med injustering av FTX-aggregaten till 46 l/s. Tilluftsflödet antogs ligga konstant vid detta flöde under hela den aktuella mätperioden.

Temperaturer i ventilationsaggregaten uppmättes med temperaturgivare som placerats i tillufts-, avlufts-, frånlufts- och uteluftskanalerna. Givaren för att mäta tilluftstemperaturen var placerad efter värmebatteriet. Mätningar loggades med 15-minutersintervaller.

Mätdata för värmeförluster som sker via forceringsluftflöde i evakuerande spiskåpa och till följd av vädring saknas. För att kompensera för sådana förluster valdes ett lägre värde för nyttiggjord spillvärme från hushållsel (se kap 5.1.2).

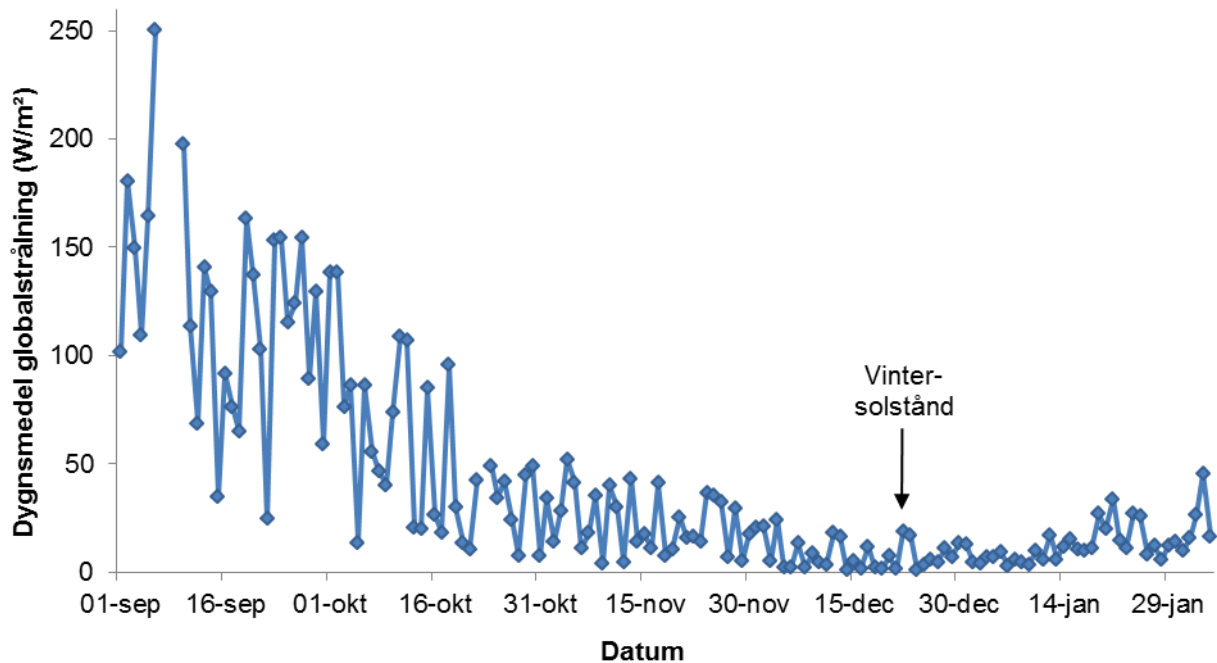
5.1.6 Inomhus- och utomhustemperaturer (T_i och T_e)

Inomhustemperaturer i respektive villa uppmättes med lufttemperaturgivare och loggades varje timme.

Utomhustemperaturer uppmättes med lufttemperaturgivare lokalt i området och loggades varje timme.

5.1.7 Nyttiggjord värmeeffekt från solinstrålning (P_{sol})

Den globala solinstrålningen (summan av diffus och direkt solinstrålning) mättes med pyranometer lokalt i området (100-300 m från villorna). Globalstrålningen var som lägst i anslutning till vintersolståndet (2013-12-21), se Figur 1.



Figur 1 Uppmätt global solinstrålning i villaområdet under perioden 2013-09-01 till och med 2014-02-04.

Eftersom metoden bygger på att mätdata från perioder med försumbart låg solinstrålning används (så att P_{sol} kan antas vara noll) undersöktes hur användning av data från fyra olika perioder i anslutning till vintersolståndet påverkar bestämningen av energisignaturen. De fyra valda analysperioderna är:

- 2013-12-05 – 2014-01-18: Den längsta sammanhängande perioden med försumbart låg global solinstrålning ($<20 \text{ W/m}^2$) i området.
- 2013-12-06 – 2014-01-05: 1 månad symmetriskt runt vintersolståndet. Under perioden uppmättes inga dygnsmedelvärden över 20 W/m^2 .
- 2013-11-21 – 2014-01-21: 2 månader symmetriskt runt vintersolståndet. Under perioden uppmättes åtta dygnsmedelvärden över 20 W/m^2 , men inga över 40 W/m^2 .
- 2013-11-06 – 2014-02-04: 3 månader symmetriskt runt vintersolståndet. Under perioden uppmättes 19 dygnsmedelvärden över 20 W/m^2 , men inga över 50 W/m^2 .

5.1.8 Värmelagring (P_{dyn})

Metoden bygger på att värmelagringen kan antas vara försumbart låg eller alternativt vara oberoende av temperaturdifferensen ($T_i - T_e$), dvs. vara mer eller mindre konstant över tiden.

Ett sätt att reducera inverkan från att värmelagringen i byggnaden varierar över tiden är att använda data som medelvärdesbildats över en period som är längre än byggnadens tidskonstant. Villornas tidskonstant har i projekteringsskedet uppskattats till 2,6 dygn, varav klimatskalet står för ca 71% och innerväggarna står för resterande ca 29%. I detta arbete

användes och analyserades två alternativa metoder för medelvärdesbildning över tre alternativa periodlängder som motsvarar eller är längre än uppskattad tidskonstant:

- Medelvärdesbildning över två, tre respektive fyra konsekutiva dygn (M2, M3 respektive M4).
- Glidande medelvärdesbildning över två, tre respektive fyra konsekutiva dygn (GM2, GM3 respektive GM4). Metoden innebär att medelvärdet av alla värden inom tidsintervallet två, tre eller fyra dygn beräknades så att medelvärdet förändras när intervallet flyttas (glider) framåt i tiden. Exempelvis beräknades GM3 genom att först medelvärdesbilda de tre första dygnens medelvärden, sedan lägga till nästa dags medelvärde och dra ifrån det första dygnets medelvärde och beräkna ett nytt medelvärde, och fortsätta så till slutet av den analyserade tidsperioden.

Ett annat sätt att reducera värmelagringens inverkan är att använda data som medelvärdesbildats över två dagar under vilka jämförbara mängder värme har lagrats respektive frigjorts i byggnaden (Andersson et al. 2010). Metoden benämns parning. I detta arbete användes och analyserades två alternativa metoder för parning:

- Parning som enbart beaktar värmelagring. Metoden baseras på en uppskattning av temperaturförändringen i byggnadens termiska massa, där både klimatskal och intern termisk massa beaktas, mellan två konsekutiva dagar. Temperaturförändringen beräknas som förändringen av $(T_i - T_e)/2 + \omega T_i$ mellan två konsekutiva dygn där viktningfaktorn ω representerar förhållandet mellan den interna termiska massan och klimatskalets termiska massa ($0,29/0,71 = 41\%$) för villorna. Utifrån beräknad temperaturförändring sorteras datamängden så att två dygn med jämförbara absolutbelopp men motsatt tecken (dvs. ökning respektive minskning i lagringstemperatur) ”paras” genom medelvärdesbildning, vilket minimerar variationen i temperaturförändringen i datamängden. Metoden beskrivs detaljerat av Andersson et al. (2010, s. 20-22 och Bilaga 1).
- Parning som beaktar värmelagring och solinstrålning. Metoden innebär att de nya datapunkter som skapats genom parning enligt punkten ovan sorteras efter mängden globalstrålning. Därefter paras de två datapunkter med högst respektive lägst värde för globalstrålning successivt genom medelvärdesbildning så att variationen i globalstrålning i datamängden minimeras. Avsikten med denna metod är, förutom att reducera värmelagringens inverkan, även att minimera inverkan från solinstrålningens bidrag genom att utjämna dess tidsberoende.

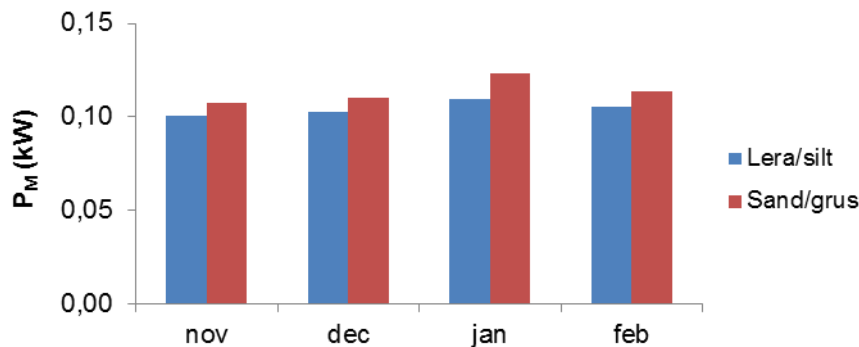
5.1.9 Värmeförluster via transmission inklusive luftläckage mot uteluft ($UA_t + Q_L \rho C_p$)

Värmeförluster via transmission inklusive luftläckage mot uteluft för respektive villa uppskattades genom enkel linjär regression av använd effekt för uppvärmning mot temperaturskillnaden mellan inne- och uteluft enligt ekv. 7 (där värmeförlusterna motsvarar regressionslinjens lutning). Uppskattningen bygger på antagandet att P_M i ekv. 7 (som

motsvarar värdet där regressionslinjen skär y-axeln) är relativt konstant under den analyserade tidsperioden.

5.1.10 Värmeförlust till mark (P_M)

För att kontrollera antagandet om konstant markförlust under den analyserade tidsperioden beräknades månadsmedelvärden för markförlusten enligt SS-EN ISO 13370:2007 utifrån uppgifter om villornas geometri, konstruktion och temperaturer. Av Figur 2 framgår att den beräknade markförlusten är relativt konstant under perioden november till och med februari. I detta arbete antogs därför att markförlusten var konstant under analysperioderna.



Figur 2 Beräknade månadsmedelvärden för värmeförlust till mark från villorna under olika markförhållanden.

5.2 Flerbostadshus med FVP

Tillgängliga mätdata för flerbostadshuset härrör från perioden 2012-09-11 till och med 2013-02-25. Bortfallet var sju dygn, varav fyra i november och tre dygn i januari.

Eftersom inga mätningar för luftflöde och temperaturer i FVP fanns tillgängliga togs ekv. 2, tillsammans med antagandet om att bidragen från solinstrålning (P_{sol}) och värmelagring (P_{dyn}) kan försummas, som utgångspunkt för bestämning av byggnadens totala värmeförlustfaktor, dvs. transmission- och ventilationsförluster mot uteluft (F). Mätningar och gjorda antaganden för parametrarna i ekv. 2 samt för P_{sol} och P_{dyn} beskrivs i kapitel 5.2.1-10.

5.2.1 Tillförd värmeeffekt via värmesystemet (P_v)

Uppmätt värmeenergi bestämdes utifrån att från uppmätt total fjärrvärmeenergi – som inkluderar energi för uppvärmning av tappvarmvatten, spetsvärme till radiatorkretsen och den konstanta varmvattencirkulationen i VVC-ledningar – subtrahera uppmätt energi för uppvärmning av tappvarmvatten. Undermätning av VVC saknas, vilket innebär att den uppmätta uppvärmningsenergin inkluderar VVC-förluster.

5.2.2 Nyttiggjord värmeeffekt från elanvändning (αP_{el})

Elanvändningen består av hushållsel och fastighetsel och sker i huvudsak innanför klimatskalet då ingen motorvärmare, utebelysning eller andra större laster finns utomhus, förutom utebelysning. Elanvändningen för fastighetsel, inklusive driftel för

frånluftsvärmepumpen, har mätts. Dessutom gjordes undermätning av använd el för frånluftsvärmepumpen. Mätningarna skedde med 10-minutersintervaller.

Mätdata för hushållselanvändningen i flerbostadshuset saknas. Hushållselanvändningen uppskattades därför utifrån lägenhetsfördelningen i huset och statistiska data för genomsnittlig hushållselanvändning i lägenheter av olika storlek i flerbostadshus som tagits fram inom SBUF/LÅGAN-projektet THUVA (Temperatur, Hushållsel och tappVatten; Bagge et al., 2012, s. 16-32).

Nyttjandegraden α för hushålls- och driftel (exklusive el till FVP) antogs till 70% i enlighet med Svebys schablon för spillvärme från hushållsel (Sveby 2012a, s. 25).

Nyttjandegraden α för driftel till FVP antogs till 0% i enlighet med Svebys rekommendation för spillvärme från fläktel då fläktmotorn sitter efter värmeväxlaren (Sveby 2009, s. 12).

5.2.3 Nyttiggjord värmeeffekt från varmvatten (βP_{vv})

Bidraget från varmvatten, via värmeförluster, till husets uppvärmning är svårt att uppskatta. Bidraget beror på faktorer som temperaturskillnad mellan vatten och inomhusluften, isolering av varmvattenledningen, ledningens längd samt förekomst av varmvattencirkulation (VVC). Samtidigt nyttjas också kallvatten som värms upp passivt innan det lämnar huset genom avloppet. I detta arbete antogs att bidraget från använt varmvatten till P_{vv} är försumbart, dvs. att den nyttiggjorda värmen från varmvattenet balanseras av värmeförlusten från kallvattnet.

Nyttiggjord värme från den konstanta varmvattencirkulationen inkluderas dock i P_v .

5.2.4 Nyttiggjord värmeeffekt från personvärme (P_p)

Bidraget från personvärme till husets uppvärmning är beroende av antalet personer och deras vistelsetid innanför klimatskalet, aktivitet och storlek. För personvärmen antogs en värmeavgivning om 80W per person.

Eftersom data för antal boenden och deras vistelsetider i flerbostadshuset saknas har bidraget till uppvärmningen från personvärme uppskattats utifrån Svebys schablonvärden (Sveby 2012a, s. 27-28).

5.2.5 Tillförd värmeeffekt via värmebatteri i luftbehandlingsaggregat (P_{lb})

Den tillförda värmeeffekten som skickades från frånluftsvärmepumpen till radiatorkretsen uppmättes med 10-minutersintervaller.

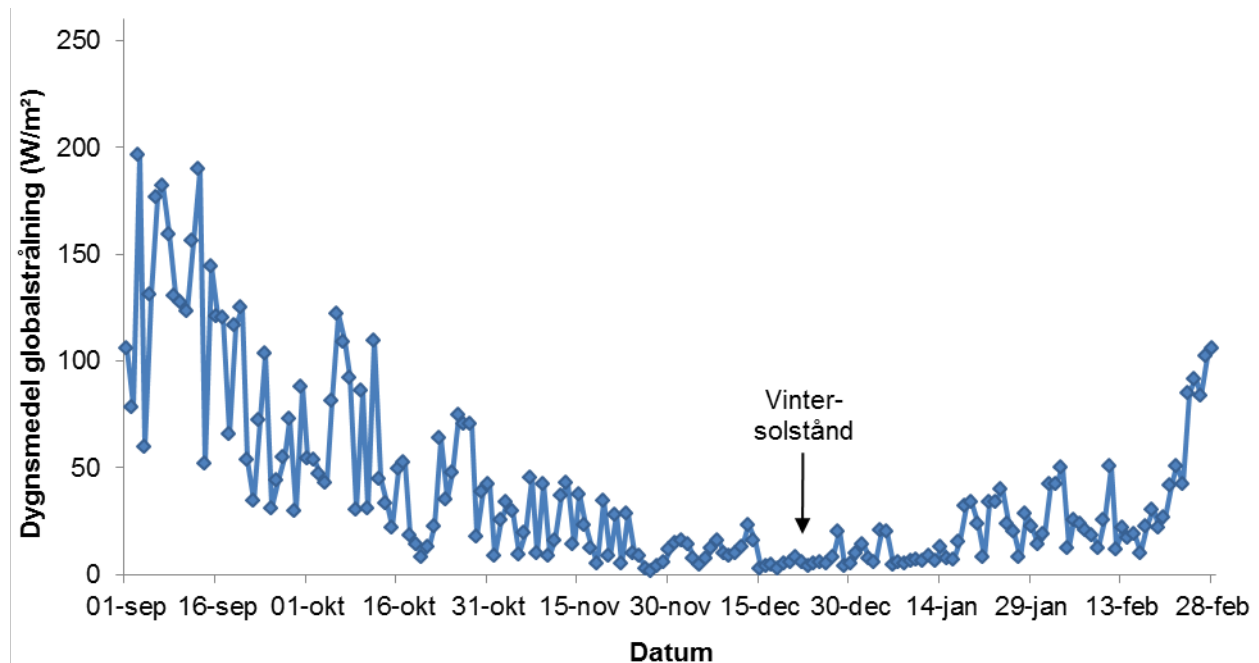
5.2.6 Inomhus- och utomhustemperaturer (T_i och T_e)

Inomhustemperatur uppmättes med lufttemperaturgivare i byggnadens gemensamma frånluftskanal och loggades med 10-minutersintervaller.

Utomhustemperatur uppmättes med lufttemperaturgivare lokalt i området och loggades med 10-minutersintervaller.

5.2.7 Nyttiggjord värmeeffekt från solinstrålning (P_{sol})

Inga mätningar av solinstrålningen har gjorts lokalt vid flerbostadshuset. Timmedelvärden för globalstrålning (summan av diffus och direkt solinstrålning) har därför hämtats från SMHIs närmaste väderstation, som är belägen ca 15 km från flerbostadshuset. Solinstrålningen är som lägst i anslutning till vintersolståndet (2012-12-21), se Figur 3.



Figur 3 Uppmätt globalstrålning vid SMHIs närmaste väderstation under perioden 2012-09-01 till och med 2013-02-28.

Eftersom metoden bygger på att mätdata från perioder med försumbart låg solinstrålning används (så att P_{sol} kan antas vara noll) undersöktes hur användning av data från fem olika perioder i anslutning till vintersolståndet påverkar bestämningen av energisignaturen. De fem valda perioderna är:

- 2012-12-14 – 2013-01-17: Den längsta sammanhängande perioden med försumbart låg global solinstrålning (<20 W/m²).
- 2012-12-06 – 2013-01-05: 1 månad symmetriskt runt vintersolståndet. Under perioden uppmättes tre dygsmedelvärden som låg knappt över 20 W/m².
- 2012-11-21 – 2013-01-21: 2 månader symmetriskt runt vintersolståndet. Under perioden uppmättes åtta dygsmedelvärden över 20 W/m², men inga över 40 W/m².
- 2012-11-06 – 2013-02-04: 3 månader symmetriskt runt vintersolståndet. Under perioden uppmättes 26 dygsmedelvärden över 20 W/m², men inga över 50 W/m².
- 2012-10-21 – 2013-02-21: 4 månader symmetriskt runt vintersolståndet. Under perioden uppmättes 48 dygsmedelvärden över 20 W/m² och fem över 50 W/m².

5.2.8 Värmelagring (P_{dyn})

För att reducera inverkan från att värmelagringen i byggnaden varierar över tiden användes samma metoder som för villorna (se kapitel 5.1.8), men vid medelvärdesbildning användes andra periodlängder eftersom flerbostadshuset har en annan tidskonstant än villorna. Tidskonstanten för flerbostadshuset är ej känd men har uppskattats till maximalt tolv dygn i enlighet med FEBY12s schablon för tung byggnad (SCN 2012, s. 14). Sammanfattningsvis användes och analyserades följande fyra metoder för förbehandling av data:

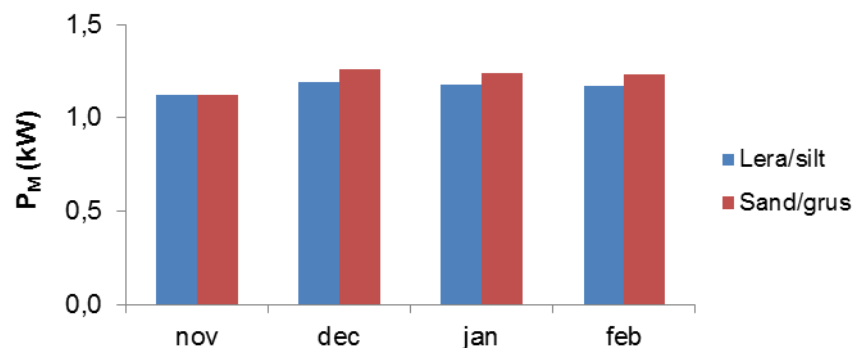
- Medelvärdesbildning över fyra, åtta respektive tolv konsekutiva dygn (M_4 , M_8 respektive M_{12}).
- Glidande medelvärdesbildning över fyra, åtta respektive tolv konsekutiva dygn (GM_4 , GM_8 respektive GM_{12}).
- Parning som enbart beaktar värmelagring.
- Parning som beaktar värmelagring och solinstrålning.

5.2.9 Värmeförluster via transmission och ventilation - total värmeförlustfaktor (F)

Flerbostadshusets totala värmeförlustfaktor, dvs. värmeförluster via transmission och ventilation mot uteluft, uppskattades genom enkel linjär regression av använd effekt för uppvärmning mot temperaturskillnaden mellan inne- och uteluft enligt ekv. 2 (där värmeförlusterna motsvarar regressionslinjens lutning). Uppskattningen bygger på antagandet att P_M i ekv. 2 (som motsvarar värdet där regressionslinjen skär y-axeln) är relativt konstant under den analyserade tidsperioden.

5.2.10 Värmeförlust till mark (P_M)

För att kontrollera antagandet om konstant markförlust under den analyserade tidsperioden beräknades månadsmedelvärden för markförlusten enligt SS-EN ISO 13370:2007 utifrån uppgifter om flerbostadshusets geometri, konstruktion och temperaturer. Av Figur 4 framgår att den beräknade markförlusten är relativt konstant under perioden november till och med februari. I detta arbete antogs därför att markförlusten var konstant under analysperioderna.

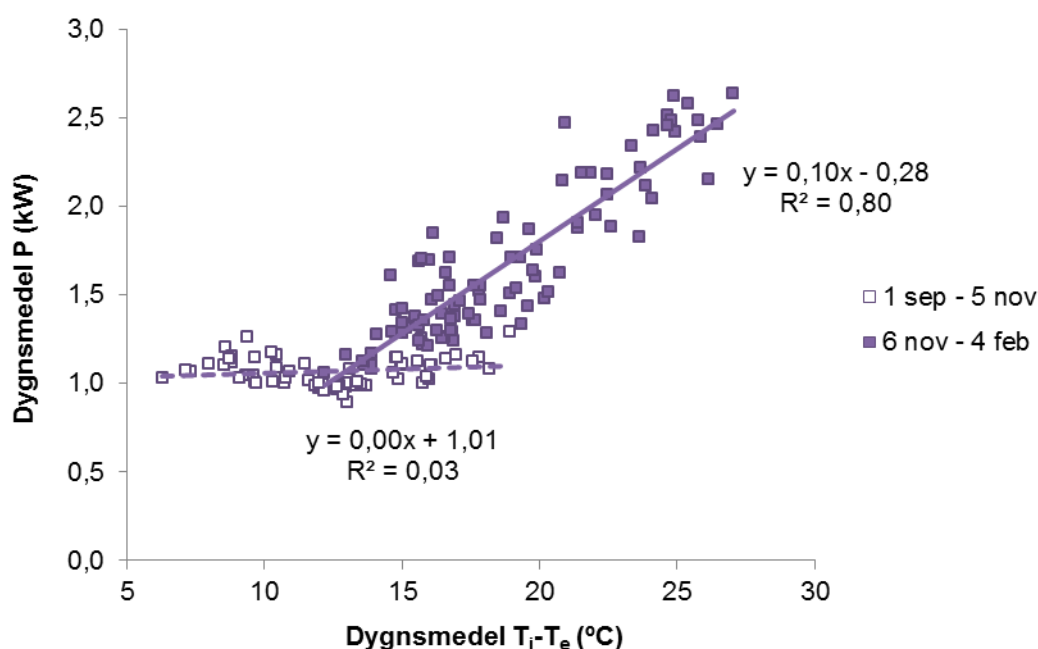


Figur 4 Beräknade månadsmedelvärden för värmeförlust till mark från flerbostadshuset under olika markförhållanden.

6. Resultat och analys

6.1 Villor med FTX

För att kontrollera lämpligheten i valet av analysperioder uppskattades energisignaturen för de tre villorna (Hus 1-3) med linjär regression enligt ekv. 7 baserat på dygnsmedeldata för hela den tillgängliga mätperioden 2013-09-01 till och med 2014-02-04. Som exempel visas resultatet för Hus 1 i Figur 5. Regressionerna för Hus 2 och 3 gav liknande resultat.

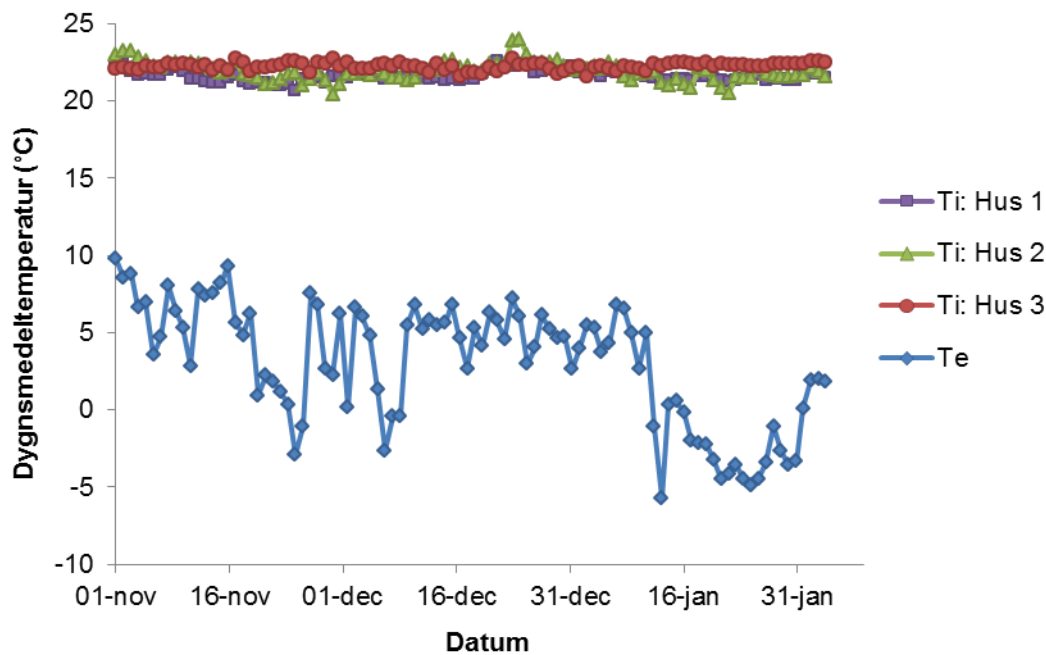


Figur 5 Energisignatur för Hus 1 baserat på dygnsmedelvärden för mätdata från hela den tillgängliga mätperioden 2013-09-01 till och med 2014-02-04.

Datapunkterna som i Figur 5 ligger relativt konstant runt en effektanvändning om 1 kW härrör från perioden innan 6 nov. En tremånadersperiod, med start 6 nov, runt vintersolståndet förefaller därför vara längsta möjliga analysperiod där effektanvändningen ökar med ökad temperaturskillnad mellan inne och ute ($T_i - T_e$). Detta motsvarar den längsta analyserade tidsperioden, dvs. 3 mån: 6 nov – 4 feb (se kapitel 5.1.7).

6.1.1 Inverkan från inom- och utomhustemperatur

För att genom en regressionsanalys erhålla en god uppskattning av villornas energisignatur bör temperaturskillnaden mellan inne och ute vara så stor och så varierande som möjligt under den analyserade tidsperioden. Inomhustemperaturen (T_i) i villorna var relativt konstant under perioden, se Figur 6. Utomhustemperaturen (T_e) varierade mellan -6 °C och 10 °C under perioden som helhet, men variationen under perioden 10 dec t.o.m. 10 jan var liten (4 °C). Det innebär att skillnaden mellan inom- och utomhustemperaturen var relativt konstant under merparten av de två kortaste analysperioderna 5 dec – 18 jan respektive 6 dec – 5 jan.



Figur 6 Uppmätta inomhustemperaturer (T_i) och utomhustemperaturer (T_e) för villorna (Hus 1-3).

6.1.2 Inverkan från mätperiodens längd och metod för förbehandling

Värmeförluster via transmission inklusive luftläckage mot uteluft för respektive villa uppskattades genom linjär regression enligt ekv. 7 för fyra olika analysperioder (se kapitel 5.1.7) baserat på fyra olika metoder för förbehandling av data (se kapitel 5.1.8). Resultaten redovisas i Tabell 1.

Regressionens förklaringsgrad (R^2), som beskriver hur väl den linjära anpassningen förklarar relationen mellan totalt använd värmeeffekt och temperaturskillnad över klimatskalet, anges i tre intervall. Värdet större än 75% (markerade med grönt) anges ofta som ett riktvärde för bra regressionsmodeller. Av redovisningen i Tabell 1 framgår att data för tidsperioden 1 mån för Hus 1 inte ger en användbar regressionsmodell ($R^2 < 50\%$). Även flera av modellerna för de kortare tidsperioderna för Hus 1 och 2 bör tolkas med försiktighet eftersom de har förklaringsgrader som understiger 75%.

I Tabell 1 anges förutom medelvärdet för uppskattad värmeförlust (dvs. regressionslinjens lutning) även medelfelet för uppskattningen (procentuell avvikelse från regressionslinjen). Medelfelet är ett mått på robustheten (precisionen) i uppskattningen av värmeförlusten: ju mindre fel, desto mer robust är uppskattningen. Förbehandling av data enligt traditionell medelvärdesbildning (M) eller parning (P) ger generellt högre medelfel än vad som fås genom förbehandling med glidande medelvärdesbildning (GM). Hur många dygn (2, 3 eller 4) som medelvärdesbildningen enligt M eller GM bygger på påverkar också medelfellets storlek. Regressioner som baseras på M2 ger generellt något lägre medelfel än regressioner som baseras på M3 och M4 (även om skillnaden är mindre för Hus 3), vilket beror på att medelvärdesbildning över fler dygn medför att det finns färre datapunkter kvar som kan ingå i

regressionen. Det motsatta gäller för förbehandling enligt GM där regressioner som baseras på GM2 i de flesta fall ger något högre medelfel än regressioner som bygger på GM3 och GM4. Generellt varierar medelvärdet för den uppskattade värmeförlusten något mer mellan M2-M4 än mellan GM2-GM4, vilket beror på att färre datapunkter förloras vid förbehandling enligt GM än vid förbehandling enligt M. Av de båda metoderna för parning ger P_{Dyn} oftast lägre medelfel än $P_{\text{Dyn+Sol}}$, vilket beror på att förbehandling enligt $P_{\text{Dyn+Sol}}$ innebär att antalet datapunkter halveras jämfört med förbehandling enligt P_{Dyn} .

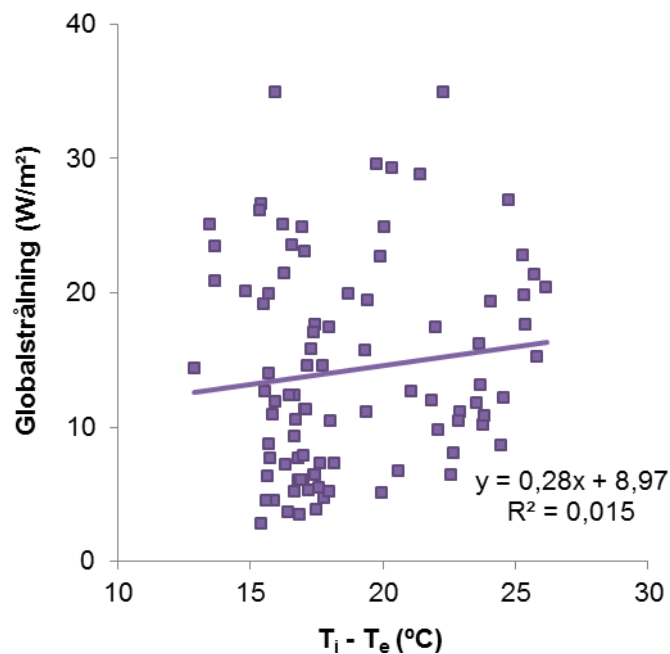
Tabell 1 Medelvärden (med procentuellt medelfel inom parentes) på uppskattad värmeförlust i kW/K för Hus 1-3 baserat på data från olika tidsperioder som förbehandlats genom olika metoder för medelvärdesbildning och parning.

■ $R^2 < 50\%$; ■ $R^2 = 50-74\%$; ■ $R^2 \geq 75\%$

	M2	M3	M4	GM2	GM3	GM4	P_{Dyn}	$P_{\text{Dyn+Sol}}$
Hus 1								
5 dec - 18 jan	0,099 (16%)	0,099 (22%)	0,11 (21%)	0,10 (10%)	0,11 (10%)	0,11 (11%)	0,10 (12%)	0,088 (16%)
1 mån: 6 dec - 5 jan	0,063 (40%)	0,056 (54%)	0,075 (54%)	0,064 (26%)	0,063 (28%)	0,059 (32%)	0,076 (33%)	0,082 (43%)
2 mån: 21 nov - 21 jan	0,098 (11%)	0,092 (16%)	0,11 (16%)	0,098 (8%)	0,099 (8%)	0,10 (9%)	0,10 (11%)	0,13 (8%)
3 mån: 6 nov - 4 feb	0,11 (6%)	0,11 (8%)	0,12 (8%)	0,11 (5%)	0,11 (4%)	0,11 (4%)	0,12 (7%)	0,11 (8%)
Hus 2								
5 dec - 18 jan	0,081 (13%)	0,074 (21%)	0,080 (19%)	0,080 (8%)	0,084 (8%)	0,089 (8%)	0,073 (14%)	0,080 (16%)
1 mån: 6 dec - 5 jan	0,067 (16%)	0,064 (21%)	0,069 (23%)	0,062 (12%)	0,065 (11%)	0,068 (12%)	0,072 (13%)	0,082 (10%)
2 mån: 21 nov - 21 jan	0,072 (18%)	0,076 (23%)	0,090 (24%)	0,073 (13%)	0,078 (12%)	0,082 (13%)	0,077 (14%)	0,073 (23%)
3 mån: 6 nov - 4 feb	0,085 (10%)	0,087 (11%)	0,092 (12%)	0,085 (7%)	0,088 (6%)	0,090 (6%)	0,084 (9%)	0,086 (11%)
Hus 3								
5 dec - 18 jan	0,095 (9%)	0,098 (9%)	0,097 (11%)	0,099 (6%)	0,098 (5%)	0,097 (5%)	0,099 (9%)	0,12 (15%)
1 mån: 6 dec - 5 jan	0,093 (17%)	0,10 (14%)	0,093 (21%)	0,093 (10%)	0,096 (8%)	0,093 (8%)	0,11 (16%)	0,12 (12%)
2 mån: 21 nov - 21 jan	0,091 (8%)	0,090 (10%)	0,093 (11%)	0,092 (6%)	0,092 (5%)	0,093 (5%)	0,094 (11%)	0,085 (15%)
3 mån: 6 nov - 4 feb	0,096 (5%)	0,098 (5%)	0,10 (5%)	0,098 (3%)	0,099 (3%)	0,10 (3%)	0,10 (7%)	0,10 (11%)

Regressioner som bygger på data från den längsta tidsperioden (3 mån) ger, oavsett vilken metod för förbehandling som används, lägre medelfel än regressioner som bygger på de kortare tidsperioderna (1 mån, 2 mån respektive 5 dec - 18 jan). Förklaringen ligger dels i att längre tidsperioder innebär att fler datapunkter kan ingå i regressionen, dels i att de kortare perioderna också har den minsta variationen i $T_i - T_e$ (se kapitel 6.1.1).

En invändning mot att använda data från den längsta perioden (3 mån) är att solinstrålningen inte kan anses vara försumbar under hela perioden (se kapitel 5.1.7). Om solen bidrar mer vid lägre värden på $T_i - T_e$ (varmare utomhusklimat) än vid högre temperaturdifferenser resulterar det i en överskattning av värmeförlusten. Av Figur 7, som avser Hus 1, framgår dock att solen under 3 mån-perioden i stort har bidragit lika mycket vid olika temperaturskillnader ($T_i - T_e$), vilket illustreras av den mycket svaga samvariation mellan globalstrålning och $T_i - T_e$ som regressionslinjen indikerar. Det innebär att uppskattningen av värmeförlusten inte kan ha påverkats nämnvärt av solens bidrag, vilken även stöds av att medelvärdena i Tabell 1 förefaller vara oberoende av tidsperiodens längd. Exempelvis är medelvärdena för perioden 5 dec – 18 jan i samma nivå som medelvärdena för 3 mån-perioden. Eftersom solens bidrag kan anses vara försumbart ger heller inte förbehandling enligt $P_{\text{Dyn}+\text{Sol}}$ någon annan effekt än att medelfelet blir högre till följd av att antalet datapunkter minskar jämfört med P_{Dyn} .

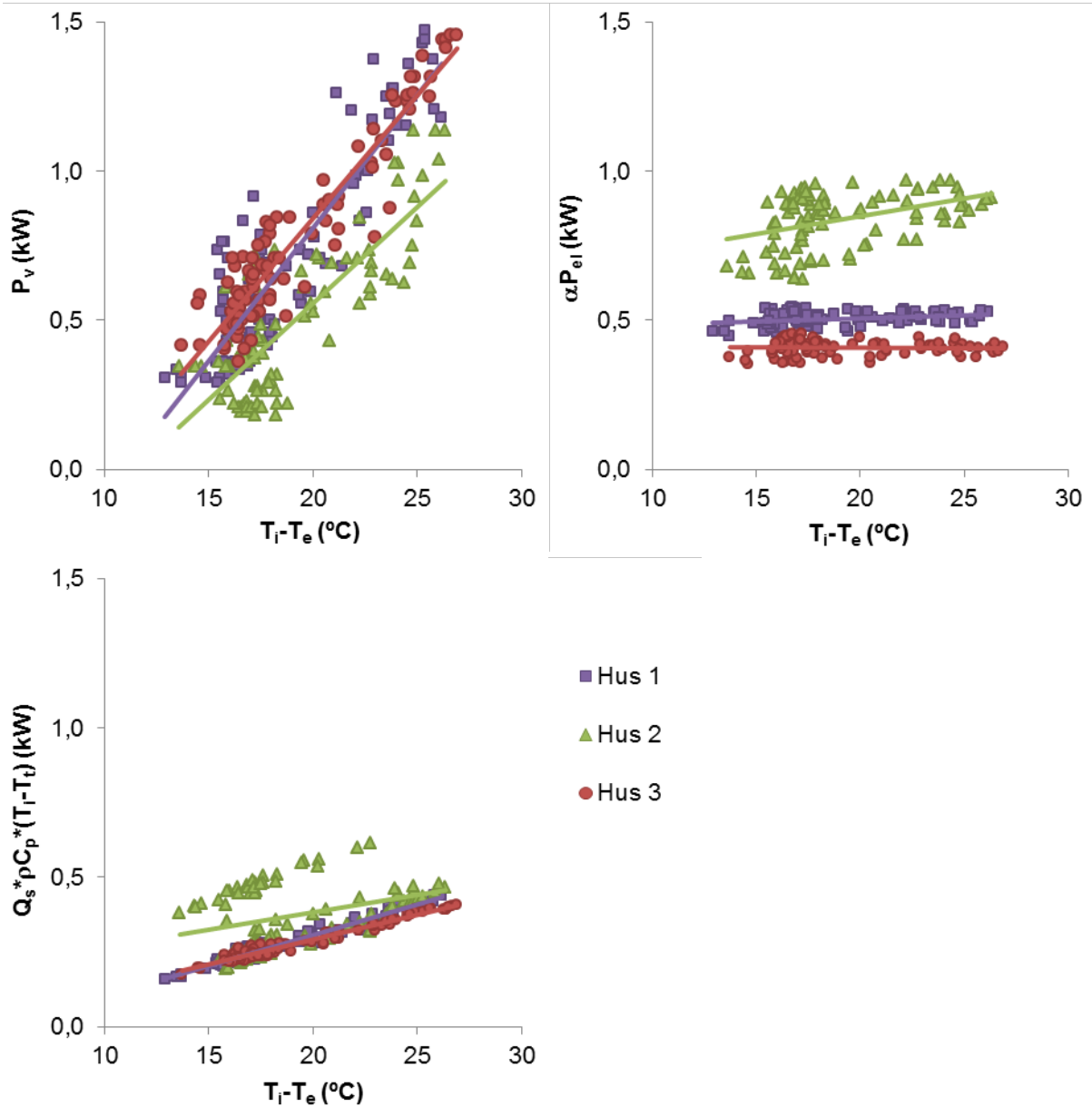


Figur 7 Globalstrålning vs. skillnad mellan inom- och utomhustemperatur ($T_i - T_e$) för Hus 1. Mätdata är från perioden 6 nov – 4 feb och har förbehandlats genom glidande medelvärdesbildning över tre konsekutiva dygn (GM3).

Enligt Tabell 1 ger förbehandling av data genom glidande medelvärde över tre eller fyra konsekutiva dygn (dvs. GM3 eller GM4) och användning av data från en period om tre månader symmetriskt runt vintersolståndet den mest robusta uppskattningen av värmeförlusten för villorna. I efterföljande resultatpresentation och analys redovisas därför data för GM3 från perioden 3 mån (6 nov – 4 feb).

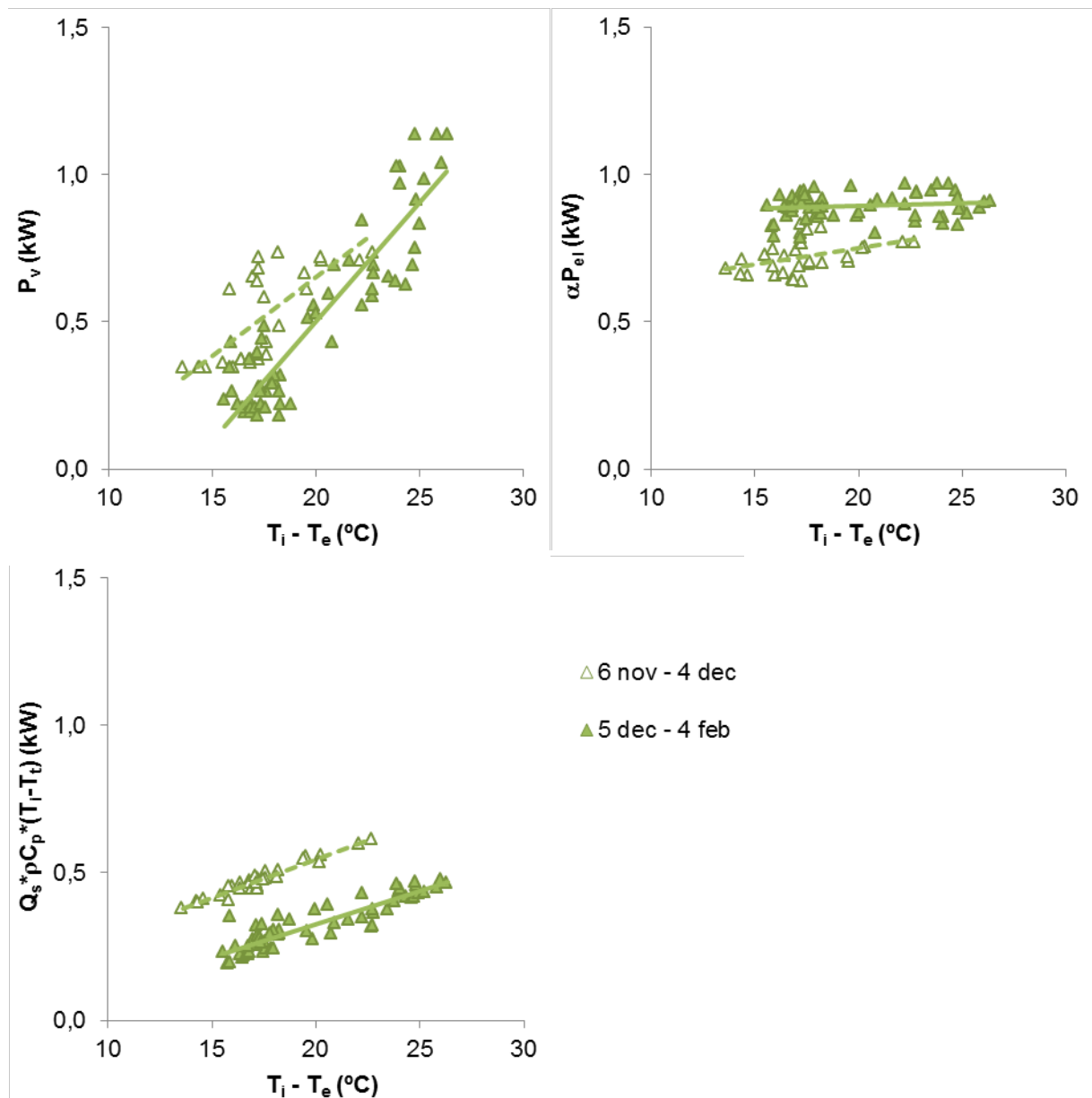
6.1.3 Inverkan från uppvärmning via värmesystem, elanvändning och tilluft

Vid beräkningar enligt ekv. 7 är det endast använd effekt för uppvärmning via värmesystem (P_v), elanvändning (αP_{el}) och tilluft ($Q_t \rho C_p (T_i - T_t)$) som påverkar den uppskattade värmeförlusten eftersom bidraget från varmvatten (P_{vv}) antogs vara försumbart (se kapitel 5.1.3) och P_p antogs vara konstant över tid (se kapitel 5.1.4). Hur dessa tre parametrar påverkar värmeförlusten som beräknas enligt GM3 för 3 mån-perioden visas i Figur 8.



Figur 8 P_v , αP_{el} och $Q_s \cdot \rho C_p (T_i - T_t)$ vs. skillnad mellan inom- och utomhustemperatur ($T_i - T_e$) för villorna (Hus 1-3). Mätdata är från perioden 6 nov – 4 feb och har förbehandlats genom glidande medelvärdesbildning över tre konsekutiva dygn (GM3).

För både P_v och $Q_t\rho C_p*(T_i-T_t)$ finns som förväntat en tydlig samvariation med T_i-T_e för alla tre hus och därmed en stor påverkan på den uppskattade värmeförlusten. Elanvändningen i Hus 1 och 3 är i princip oberoende av T_i-T_e och har en försumbar påverkan på värmeförlusten, medan elanvändningen i Hus 2 uppvisar ett svagt beroende av T_i-T_e . Elanvändningen under den studerade perioden är också högre i Hus 2 än i Hus 1 och 3, vilket förklarar varför P_v är lägre i Hus 2 än i de två andra husen. Data för Hus 2 avviker från Hus 1 och 3 även genom att uppvisa en större spridning i uppmätta effekter vid samma T_i-T_e under perioden. I diagrammet för $Q_t\rho C_p*(T_i-T_t)$ vs. T_i-T_e (Figur 8) syns tydligt att det finns två grupperingar av datapunkter för Hus 2. Dessa kunde härledas till två olika tidsperioder, se Figur 9.

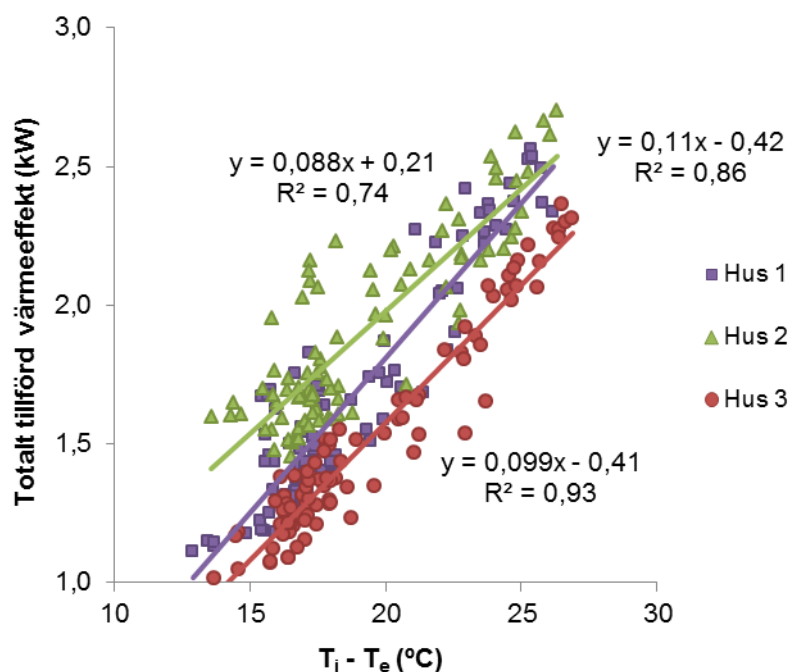


Figur 9 P_v , αP_{el} och $Q_s*\rho C_p(T_i-T_t)$ vs. skillnad mellan inom- och utomhustemperatur (T_i-T_e) för Hus 2. Mätdata är från perioden 6 nov – 4 feb och har förbehandlats genom glidande medelvärdesbildning över tre konsekutiva dygn (GM3).

I brytpunkten mellan de två tidsperioderna, den 5 dec, byttes filtret i FTX-aggregatet eftersom det hade satt igen. Av Figur 9 framgår tydligt att filterbytet resulterade i både lägre användning av värmeeffekt från värmesystemet (P_v) och lägre värmeeffekt från tilluften ($Q_s * \rho C_p (T_i - T_e)$). Förändringen i uppvärmning via elanvändning (P_{el}) beror sannolikt inte på filterbytet utan på att hushållselanvändning var markant högre (nästan 30%) under perioden december-februari än under november.

6.1.4 Uppskattad energisignatur

Energisignaturen för villorna visas i Figur 10 där en brantare lutning på regressionslinjen ger att högre värde på den uppskattade värmeförlusten. Regressionen för Hus 2 ger en något lägre värmeförlust än regressionen för Hus 1 och 3, vilket i huvudsak kan hänföras till den stora spridningen i datamängden som diskuterats ovan. Detta stöds av att uppskattningen av värmeförlusten för Hus 2 också är mindre robust (medelfel 6%) än uppskattningen av värmeförlusten för Hus 1 och 3 (medelfel 4% respektive 3%).



Figur 10 Energisignatur för villorna (Hus 1-3) baserat på mätdata från perioden 6 nov – 4 feb som förbehandlats genom glidande medelvärdesbildning över tre konsekutiva dygn (GM3).

För att kontrollera gjorda antaganden avseende nyttjandegraden α för hushållsel gjordes regressioner med ett lägre och ett högre värde; i detta fall antogs värdet 50% respektive maxvärdet 100% nyttiggjord spillvärme. Både minskningen från 80% till 50% och ökningen från 80% till 100% ledde till små förändringar i den uppskattade värmeförlusten (-0,001 kW/K respektive +0,001 kW/K för Hus 1, -0,005 kW/K respektive +0,003 kW/K för Hus 2 och -0,000 kW/K respektive +0,000 kW/K för Hus 3). Dessa resultat var förväntade då regressionslinjerna för αP_{el} i Figur 8 i princip är horisontella för Hus 1 och 3, medan linjen för

Hus 2 har en svagt positiv lutning. Däremot ledde förändringarna till att regressionslinjen parallellförsköts nedåt respektive uppåt (-0,18 kW respektive +0,12 kW för Hus 1, -0,23 kW respektive +0,15 kW för Hus 2 och -0,16 kW respektive +0,10 kW för Hus 3).

Eftersom antalet personer och deras vistelsetider i flerbostadshuset antogs vara konstanta över tid kommer en ändring i dessa värden inte påverka regressionslinjens lutning och därmed inte uppskattningen av värmeförlusten. Exempelvis leder en halvering av antal personer i byggnaden endast till att regressionslinjen parallellförskjuts nedåt (-0,09 kW för samtliga hus). Tillgång till uppmätta vistelsetider skulle påverka uppskattningen av värmeförlusten i de fall tiderna samvarierar med $T_i - T_e$.

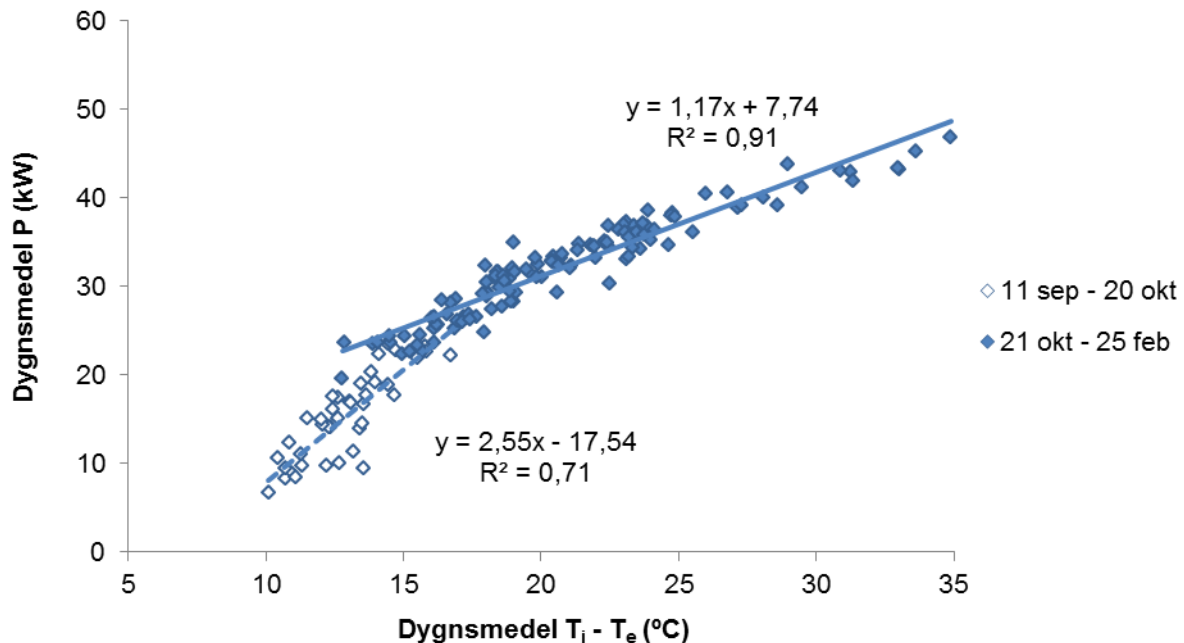
6.1.5 Jämförelse mellan uppskattad värmeförlust från energisignatur och projekterat värde

Den via energisignaturen uppskattade värmeförlusten var i medel 0,1($\pm 0,005$) kW/K för Hus 1, 0,09($\pm 0,006$) kW/K för Hus 2 och 0,1($\pm 0,003$) kW/K för Hus 3 för regression enligt GM3 med data från perioden 3 mån (se Tabell 1). Dessa värden är högre än det i projekteringskedet beräknade värdet om 0,05 kW/K. Anledningen till att skillnaden är så stor har inte kunnat identifieras, men avsaknaden av uppmätta dygnsmedelvärden för hushållselanvändningen och uppmätta vistelsetider i villorna introducerar betydande osäkerheter i den från energisignaturen uppskattade värmeförlusten. Eftersom endast månadsvärden för hushållselanvändningen mättes har data dygnsfördelats utifrån statistiska data på hur hushållselanvändningen varierar mellan olika veckodagar (se kap 5.1.2), vilket inte fångar de korrelationer som kan finnas mellan P_{el} och $T_i - T_e$. Hur vistelsetiderna varierar med $T_i - T_e$ är svårt att förutsäga, men troligen är denna eventuella korrelation av mindre betydelse än korrelationen mellan P_{el} och $T_i - T_e$.

Enligt ekv. 7 motsvarar regressionslinjens skärning med y-axeln markförlusten (P_M). Det från energisignaturen i Figur 10 uppskattade värdet på P_M var i medel -0,4($\pm 0,09$) kW för Hus 1, 0,2($\pm 0,1$) kW för Hus 2 och -0,3($\pm 0,06$) kW för Hus 3 för regression enligt GM3 med data från perioden 3 mån. Dessa värden är för Hus 1 och 3 lägre än det i projekteringskedet beräknade värdet om 0,1($\pm 0,01$) kW, som ligger närmare värdet för Hus 2. Förklaringen ligger troligen i att den uppskattade P_M i praktiken är att betrakta som en "restfaktor" som påverkas av gjorda antaganden om andelen nyttigjord värme från elanvändning och personer samt värmeförluster via vädring och spiskåpa för vilka mätdata saknas.

6.2 Flerbostadshus med FVP

För att kontrollera lämpligheten i valet av analysperioder uppskattades energisignaturen för flerbostadshuset med linjär regression enligt ekv. 2 baserat på dygnsmedeldata för hela den tillgängliga mätperioden 2012-09-11 till och med 2013-02-25, se Figur 11.

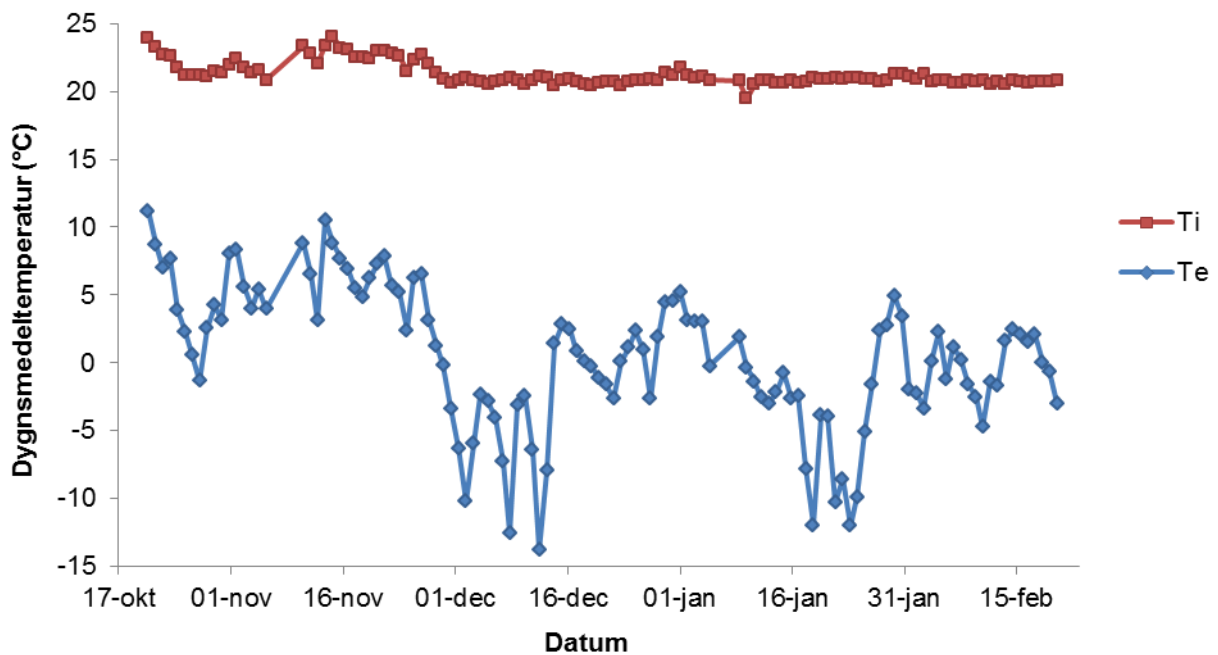


Figur 11 Energisignatur för flerbostadshuset baserat på dygnsmedelvärden för mätdata från hela den tillgängliga mätperioden 2012-09-11 till och med 2013-02-25.

Datapunkterna som i Figur 11 ligger spridda i nedre vänstra hörnet härrör från perioden innan 21 okt. En fyramånadersperiod, med start 21 okt, runt vintersolståndet förefaller därför vara längsta möjliga analysperiod där effektanvändningen tydligt ökar med ökad temperaturskillnad mellan inne och ute ($T_i - T_e$). Detta motsvarar den längsta analyserade tidsperioden, dvs. 4 mån: 21 okt – 21 feb (se kapitel 5.2.7).

6.2.1 Inverkan från inom- och utomhustemperatur

För att genom en regressionsanalys erhålla en god uppskattning av energisignaturen bör temperaturskillnaden vara så stor och så varierande som möjligt under den analyserade tidsperioden. Inomhustemperaturen (T_i) var relativt konstant under perioden, medan utomhustemperaturen (T_e) varierade mellan -14 °C och 11 °C under mätperioden, se Figur 12. Skillnaden mellan inom- och utomhustemperaturen var relativt stor och varierande under hela perioden.



Figur 12 Uppmätta inomhustemperaturer (Ti) och utomhustemperaturer (Te) för flerbostadshuset.

6.2.2 Inverkan från mätperiodens längd och metod för förbehandling

Transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft (dvs. den totala värmeförlustfaktorn) uppskattades genom enkel linjär regression enligt ekv. 2 för fem olika analysperioder (se kapitel 5.2.7) baserat på fyra olika metoder för förbehandling av data (se kapitel 5.2.8). Resultaten redovisas i Tabell 2.

Förklaringsgraden (R^2) för samtliga modeller i Tabell 2 är större än 90%, dvs. de klarar med marginal gränsen för bra regressionsmodeller om $R^2 > 75\%$. Förbehandling av data enligt traditionell medelvärdesbildning (M) eller parning (P) ger högre medelfel än vad som fås genom förbehandling med glidande medelvärdesbildning (GM), dvs. GM ger en mer robust uppskattning av värmeförlusten. Hur många dygn (4, 8 eller 12) som medelvärdesbildningen enligt M eller GM bygger på påverkar också medelfellets storlek. Regressioner som baseras på M4 ger generellt något lägre medelfel än regressioner som baseras på M8 och M12, vilket beror på att medelvärdesbildning över fler dygn medför att det finns färre datapunkter kvar som kan ingå i regressionen. För förbehandling enligt GM är skillnaden i medelfel mellan olika antal dygn liten. Av de båda metoderna för parning ger P_{Dyn} oftast lägre medelfel än $P_{\text{Dyn+Sol}}$, vilket förklaras av att förbehandling enligt $P_{\text{Dyn+Sol}}$ innebär att antalet datapunkter halveras jämfört med förbehandling enligt P_{Dyn} . Regressioner som bygger på data från längre tidsperioder ger generellt lägre medelfel än regressioner som bygger på kortare tidsperioder. För data som förbehandlats enligt GM är dock skillnaden i medelfel mellan längre och kortare tidsperioder relativt liten.

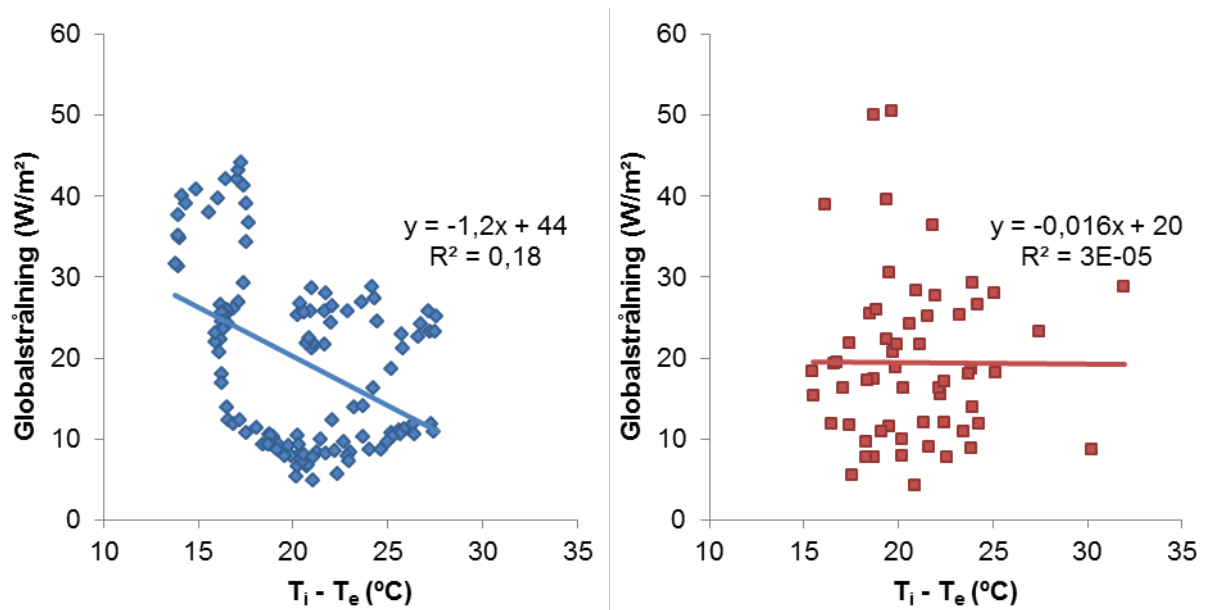
Tabell 2 Medelvärden (med medelfel inom parentes) på uppskattad värmeförlust i kW/K för flerbostadshuset baserat på olika tidsperioder samt förbehandling av data genom olika metoder för medelvärdesbildning och parning. $R^2 \geq 75\%$

	M4	M8	M12	GM4	GM8	GM12	P _{Dyn}	P _{Dyn+Sol}
14 dec – 17 jan	1,12 (9%)	1,05 (12%)	*	1,21 (4%)	1,22 (3%)	1,23 (2%)	1,21 (9%)	1,20 (12%)
1 mån: 6 dec – 5 jan	1,10 (7%)	1,02 (15%)	*	1,14 (3%)	1,13 (4%)	1,15 (5%)	1,18 (4%)	1,22 (5%)
2 mån: 21 nov – 21 jan	1,23 (7%)	1,30 (10%)	1,36 (11%)	1,24 (3%)	1,33 (3%)	1,38 (3%)	1,09 (6%)	1,18 (8%)
3 mån: 6 nov – 4 feb	1,24 (5%)	1,26 (9%)	1,37 (7%)	1,25 (3%)	1,31 (2%)	1,36 (2%)	1,12 (4%)	1,08 (6%)
4 mån: 21 okt – 21 feb	1,29 (5%)	1,41 (8%)	1,48 (7%)	1,34 (2%)	1,42 (2%)	1,47 (2%)	1,20 (3%)	1,18 (3%)

* För få data för att genomföra linjär regression.

För data som förbehandlats med medelvärdesbildning enligt M eller GM förefaller regressioner som baseras på längre tidsperioder ge högre medelvärden än de som baseras på kortare tidsperioder. Data som förbehandlats genom parning visar inte någon liknande trend. Det förefaller också vara så att regressionerna resulterar i högre medelvärden ju fler dygn som ingår i medelvärdesbildningen (enligt G eller GM). En möjlig förklaring är solens inverkan.

I Figur 13 har globalstrålningen plottats som funktion av $T_i - T_e$ för data från perioden 4 mån (21 okt - 21 feb) som förbehandlats enligt GM12 respektive P_{Dyn}. Av Figur 14 framgår att vid förbehandling enligt GM12 uppvisar globalstrålningen ett visst beroende av $T_i - T_e$ (eller T_e då T_i är relativt konstant). Solen bidrar mer vid högre T_e (lägre värden på $T_i - T_e$) än vid lägre T_e , vilket gör att värdet på den uppskattade värmeförlusten överskattas (dvs. lutningen på energisignaturens kurva skulle vara flackare om solens bidrag beaktas). Att överskattningen är mest uttalad då fler dygn ingår i medelvärdesbildningen beror på att de första medelvärdena efter "startdatumet" 21 okt byggs upp av data från dygnen före 21 okt, som var något varmare och soligare (se Figur 3) än dygnen längre fram i perioden. Vid förbehandling av data enligt P_{Dyn} dämpas dessa effekter så att globalstrålningen i princip är oberoende av T_e , se Figur 13, vilket gör att uppskattningen av värmeförlusten inte påverkas nämnvärt av solens bidrag. Detta beror på att parning med avseende på värmelagringen även medför att variationerna i både T_e och globalstrålning utjämnas samtidigt som tidsberoendet bryts (och därmed även kopplingen till förekommande säsongsvariationer).

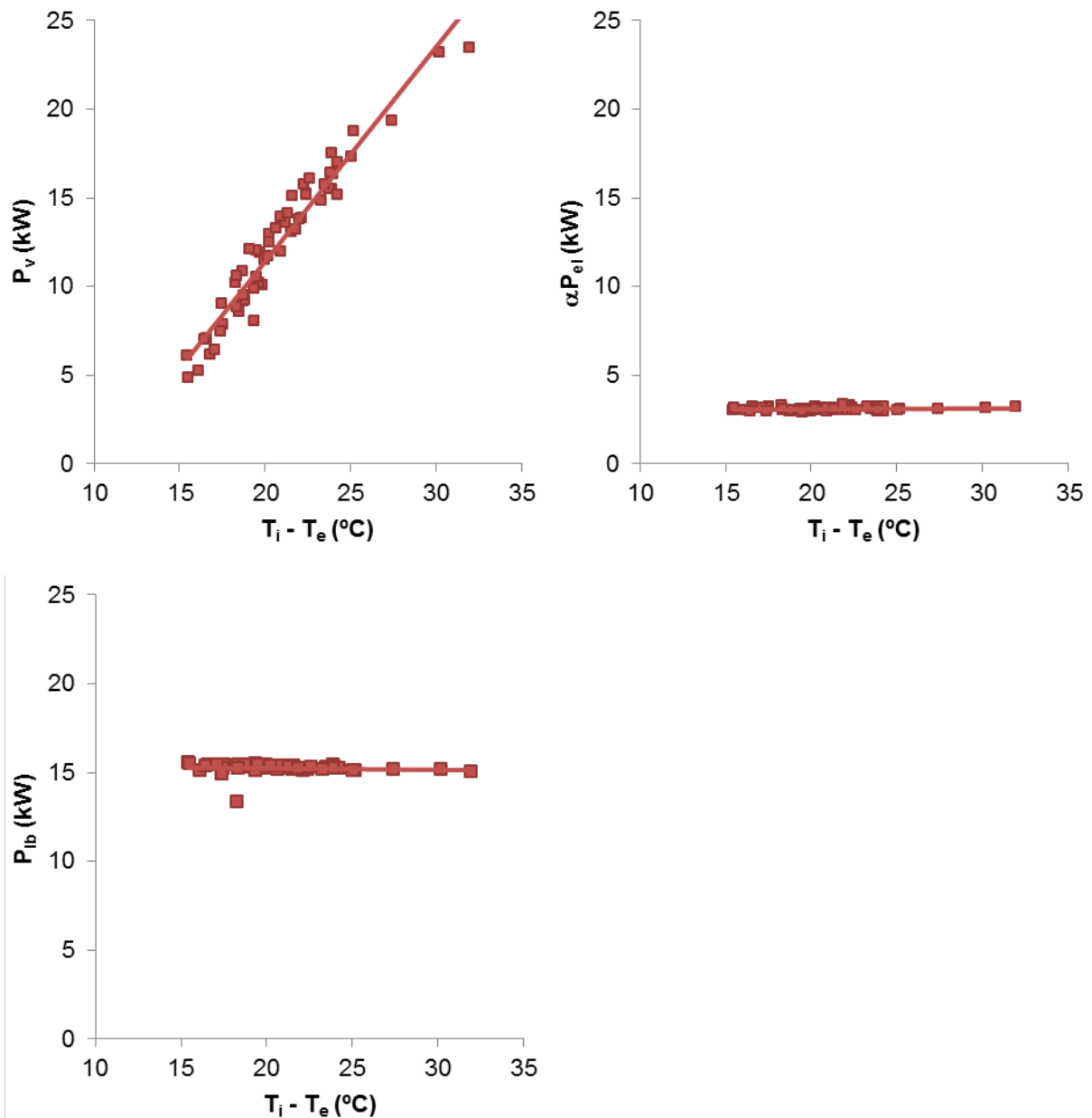


Figur 13 Globalstrålning vs. skillnad mellan inom- och utomhustemperatur ($T_i - T_e$) för flerbostadshuset. Mätdata är från perioden 21 okt – 21 feb och har förbehandlats genom GM12 (vänster) och P_{Dyn} (höger).

Enligt Tabell 2 ger förbehandling av data genom glidande medelvärde över fyra, åtta eller tolv konsekutiva dygn (dvs. GM4, GM8 eller GM12) eller parning baserad på data från en period om fyra månader symmetriskt runt vintersolståndet de mest robusta uppskattningarna av värmeförlusten (dvs. det lägsta medelfelet) för flerbostadshuset. Med hänsyn till att solens inverkan inte kan bortses ifrån i de längre tidsperioderna då GM används bör dock analyser där data förbehandlas enligt GM baseras på någon av de två kortaste perioderna (14 dec – 17 jan eller 6 dec – 5 jan). Av Tabell 2 framgår att GM som baseras på dessa perioder och data från perioden 4 mån som parats enligt P_{Dyn} ger liknande medelvärden. I efterföljande resultatpresentation och analys redovisas data för P_{Dyn} från perioden 4 mån (21 okt – 21 feb).

6.2.3 Inverkan från uppvärmning via värmesystem, elanvändning och tilluft

Vid beräkningar enligt ekv. 2 är det endast använd effekt för uppvärmning via värmesystem (P_v), elanvändning (αP_{el}) och värmebatteri i luftbehandlingsaggregat (P_{lb}) som påverkar den uppskattade värmeförlusten eftersom bidraget från varmvatten (P_{vv}) antogs vara försumbart och P_p gavs ett konstant värde (se kapitel 5.2). Hur dessa tre parametrar påverkar värmeförlusten som beräknas enligt P_{Dyn} visas i Figur 14.

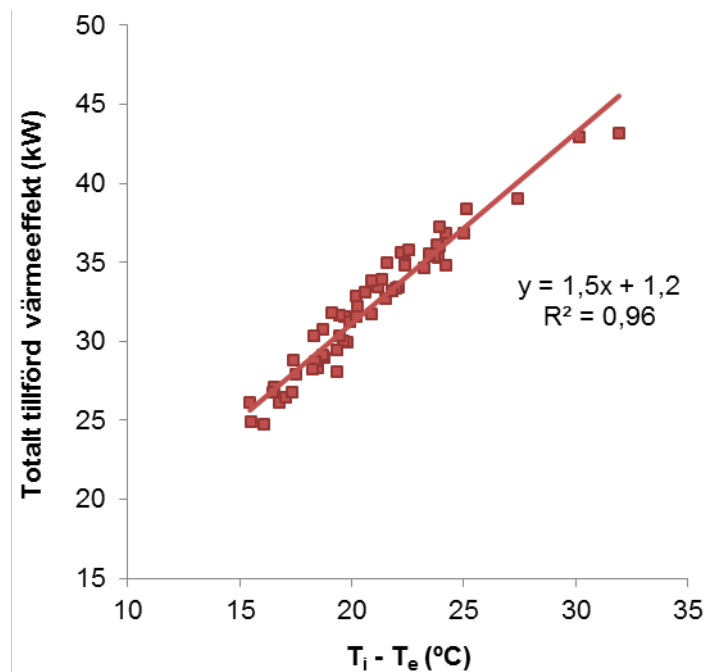


Figur 14 P_v , αP_{el} och P_{lb} vs. skillnad mellan inom- och utomhustemperatur ($T_i - T_e$) för flerbostadshuset. Mätdata är från perioden 21 okt – 21 feb och har förbehandlats genom $P_{D_{yn}}$.

För P_v finns som förväntat en tydlig samvariation med $T_i - T_e$ och därmed en stor påverkan på den uppskattade värmeförlusten. Både αP_{el} och P_{lb} är i princip oberoende av $T_i - T_e$ och har en försumbar påverkan på värmeförlusten.

6.2.4 Uppskattad energisignatur

Energisignaturen för flerbostadshuset visas i Figur 15 där en brantare lutning på regressionslinjen ger att högre värde på den uppskattade värmeförlusten.



Figur 15 Energisignatur för flerbostadshuset baserat på mätdata från perioden 21 okt – 21 feb som förbehandlats genom P_{Dyn} .

För att kontrollera gjorda antaganden avseende nyttjandegraden α för spillvärme från hushållsel gjordes regressioner med ett lägre och ett högre värde; i detta fall antogs värdet 50% respektive maxvärdet 100% nyttiggjord spillvärme. Både minskningen från 70% till 50% och ökningen från 80% till 100% ledde till små förändringar i den uppskattade värmeförlusten (-0,001 kW/K respektive +0,001 kW/K), vilket var väntat då regressionslinjen för αP_{el} i Figur 14 i princip är horisontell. Däremot ledde förändringarna till att regressionslinjen parallellförsköts nedåt respektive uppåt (-0,86 kW respektive +1,29 kW). På motsvarande sätt kontrollerades antaganden avseende nyttjandegraden β för spillvärme från varmvatten genom att ansätta det av Sveby rekommenderade schablonvärdet 20% (dvs. öka nyttjandegraden från 0% till 20%), vilket ledde till en liten ökning i den uppskattade värmeförlusten (+0,002 kW/K) samtidigt som regressionslinjen parallellförsköts uppåt (+0,36 kW).

Eftersom antalet personer och deras vistelsetider i flerbostadshuset uppskattades utifrån schablonvärden som antogs vara konstanta över tid kommer en ändring i dessa värden inte påverka regressionslinjens lutning och därmed inte uppskattningen av värmeförlusten. Exempelvis leder en halvering av antal personer i byggnaden endast till att regressionslinjen parallellförskjuts nedåt (-0,7 kW). Tillgång till uppmätta vistelsetider skulle påverka uppskattningen av värmeförlusten i de fall tiderna samvarierar med $T_i - T_e$.

6.2.5 Jämförelse mellan uppskattad värmeförlust från energisignatur och projekterat värde

Den via energisignaturen uppskattade värmeförlusten var i medel $1,2(\pm 0,04)$ kW/K för flerbostadshuset för regression enligt P_{Dyn} med data från perioden 4 mån, vilket är i god överensstämmelse med det i projekteringsskedet beräknade värdet om $1,1(\pm 2)$ kW/K. Liksom för villorna introducerar avsaknaden av mätdata för hushållselanvändning och vistelsetider

osäkerheter i uppskattningen av värmeförlusten. Avsaknaden av mätdata för hushållselanvändningen kan dock förväntas ha mindre betydelse i flerbostadshus än i villor eftersom individuella variationer utjämnas mellan lägenheter samt att personvärme och spillvärme från hushållsel utgör en relativt sett mindre andel av det totala värmebehovet.

Enligt ekv. 2 motsvarar regressionslinjens skärning med y-axeln markförlusten (P_M). I praktiken är dock denna term att betrakta som en ”restfaktor” som påverkas av gjorda antaganden om nyttiggjord värme från elanvändning och personer samt värmeförluster via vädring och spiskåpa för vilka mätdata saknas. Det från energisignaturen i Figur 15 uppskattade värdet på P_M var $1,2(\pm 0,6)$ kW för flerbostadshuset för regression enligt $P_{D_{yn}}$ med data från perioden 4 mån, vilket är i god överensstämmelse med det i projekteringskedet beräknade värdet om $1,2(\pm 0,1)$ kW.

6.3 Sammanfattning av analyserade resultat

6.3.1 Villor med FTX

Mätperiodens längd och förbehandling av data:

- Glidande medelvärde för tre konsekutiva dygn (GM3) ger störst robusthet (max. medelfel 12%) i uppskattningen av värmeförluster via transmission, inkluderande okontrollerat luftläckage, mot uteluft ($UA_t + Q_L \rho C_p$).
- Mätperioden bör vara minst 1,5 mån under en period med försumbar solinstrålning. Utökning till 3 mån ger bättre robusthet (max. medelfel 6%).

Uppskattad energisignatur:

- Brukaren har en indirekt påverkan. Exempelvis innebär högre hushållselanvändning (P_{el}) att mindre värme behöver tillföras via värmesystemet (P_v), vilket i sin tur förefaller leda till lägre uppskattning av ($UA_t + Q_L \rho C_p$) och högre uppskattning av P_M .
- Månadsvärden för hushållselanvändning förefaller vara för grov tidsupplösning. Osäker variation i P_{el} ger mindre robust uppskattning av ($UA_t + Q_L \rho C_p$).
- Antaganden om personvärme (P_p) och nyttiggjord värme från hushållselanvändning (αP_{el}) respektive varmvatten (βP_{vv}) för uppvärmning har försumbar påverkan på uppskattningen av ($UA_t + Q_L \rho C_p$), men påverkar uppskattningen av markförlusten (P_M).

6.3.2 Flerbostadshus med FVP

Mätperiodens längd och förbehandling av data:

- Glidande medelvärde (GM) ger störst robusthet (max. medelfel 5%) i uppskattningen av byggnadens totala värmeförlustfaktor (F), inkluderande transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft. GM ger dock en förhöjd uppskattning (med upp till 23%) av F för ≥ 2 månaders mätperioder p.g.a. av solens bidrag .

- Parning med avseende på värmelagring (P_{Dyn}) ger lägre robusthet (max. medelfel 9%) än GM, men när P_{Dyn} används påverkas uppskattningen av F ej av solens bidrag vid längre mätperioder (≥ 2 mån) som även ger bäst robusthet (3% medelfel).

Uppskattad energisignatur:

- Antaganden om personvärme och nyttiggjord värme från hushålls- och driftel, el till FVP och varmvatten för uppvärmning har försumbar påverkan på F.

7. Diskussion och slutsatser

Projektets syfte var att särskilja byggtreprenörens ansvarsområde från installations-entreprenörens när det gäller en byggnads energiprestanda genom att mäta en byggnads energisignatur för att säkerställa att byggtreprenören levererat det som utlovats för klimatskalet. Det är teoretiskt möjligt att med hjälp av en linjär regressionsmodell som baseras på en uppmätt energisignatur extrahera ett värmeförlustmått som beskriver byggnadens totala värmeförlustfaktor (inkluderande transmissions- och ventilationsförluster) mot uteluft respektive ett värmeförlustmått som separat beskriver klimatskalets prestanda i form av transmissionsförluster (inklusive luftläckage) mot uteluft, se kapitel 4. I detta arbete undersöktes metodens robusthet och praktiska tillämpning på två typer av lågenergihus. Resultaten från undersökningen kan användas vid praktisk tillämpning av metoden som stöd vid insamling och analys av mätdata.

7.1 Metodens robusthet (*precision*)

Vad som är en byggnads korrekta energisignatur är svårt att visa. Dock kan robustheten (precisionen) i uppskattningen av värmeförlusten bedömas. Med robustheten avses den statistiska spridningen i det erhållna värmeförlustmättet. Resultaten från de undersökta lågenergihusen visar att metoden ger robusta bestämningar av värmeförlusten med medelfel ner till 3%. Hur robust uppskattningen är varierar beroende på av valet av mätperiod och metod för förbehandling samt tillgången till data.

Metoden bygger på grundläggande antaganden om att solinstrålningens bidrag kan försummas genom att analysera mätdata från den mörkaste vinterperioden samt att värmelagringens inverkan kan försummas genom förbehandling av data. Resultaten för de studerade lågenergihusen tyder på att båda dessa grundläggande antaganden kan uppfyllas, vilket är i linje med tidigare forskning av t.ex. Andersson et al. (2010), Sjögren et al. (2009) och Vesterberg (2014).

7.1.1 Val av mätperiod

En fördel med den undersökta energisignaturmetoden är att den inte kräver mätdata för helår, vilket krävs för uppföljning av energiprestanda enligt BBR, utan det räcker med mätdata för en mörk vintersäsong. Resultaten för de studerade lågenergihusen tyder på att mätperioden helst bör vara minst 1,5 månader lång. Tidigare studier har visat att en utökning av periodens längd till 4 månader kan vara möjlig (Andersson et al. 2010; Nordström et al. 2012). Mätperioden bör förläggas i anslutning till vintersolståndet för att minimera solinstrålningens bidrag till uppvärmning. Dessutom erhålls en mer robust uppskattning av värmeförlusten om temperaturskillnaden mellan inne och ute är stor och varierande under mätperioden. Generellt blev uppskattningen mer robust om den baserades på data från längre tidsperioder (3-4 månader), men i de längre tidsperioderna kan solens bidrag inte alltid försummas. För det undersökta flerbostadshuset, som har en relativt stor glasandel av vägg (ca 35%), ledde solens bidrag till att värdet på den uppskattade värmeförlusten överskattades då mätdata från de längre tidsperioderna som förbehandlats genom medelvärdesbildning användes. Dessa resultat

är framtagna för klimatförutsättningar avseende temperatur och solinstrålning i södra Sverige för den studerande vinterperioden.

Mätdata för de här studerade lågenergihusen härstammar från den första vintern efter husens färdigställande. Eftersom tillgång till data för vinterperioder över flera år saknas vet vi inte hur den uppskattade värmeförlusten kan variera eller utvecklas med tiden. Det är t.ex. väl känt att uttorkning av betong sker under en period av flera år. Uttorkning av byggfukt medför ett ökat behov av uppvärmning under de första åren av en byggnads livstid till följd av att inomhusluften kyls då betong på insidan av isoleringsskiktet torkar. Vidare studier behövs för att utreda om det finns en korrelation mellan graden av uttorkning (och därmed mängden kyla som frigörs) och temperaturskillnaden mellan inne och ute och, i så fall, hur den kan påverka det via energisignaturen uppskattade värmeförlustmättet.

7.1.2 Val av metod för förbehandling

Av de undersökta metoderna för förbehandling av data föreföll glidande medelvärdesbildning vara mest fördelaktig eftersom den innebär att antalet datapunkter som bygger upp regressionen motsvarar antalet dygn under analysperioden. Fler datapunkter ger en mer robust regression (lägre medelfel), och därmed en säkrare bestämning av det sökta värmeförlustmättet. Med traditionell medelvärdesbildning sker en reduktion i antalet datapunkter som motsvarar antalet dygn för vilken medelvärdesbildning sker. T.ex. innebär traditionell medelvärdesbildning över två dygn att antalet datapunkter halveras. För lågenergihus, som har tidskonstanter om flera dygn, innebär den traditionella medelvärdesbildningen en avsevärd reduktion av datapunkter, dvs. för lågenergihus är glidande medelvärdesbildning ett betydligt bättre alternativ.

Parning med avseende på värmelagring föreföll vara en effektiv förbehandlingsmetod i de fall solens bidrag inte helt kunde bortses ifrån (dvs. under de längre tidsperioderna, 3-4 månader) eftersom metoden innebär att variationer mellan parade dagar i viss mån utjämnas. Andra fördelar är att parningsmetoden kan utföras utan kännedom om byggnadens tidskonstant och att den bryter andra förekommande tids-/säsongsberoenden i mätdata. Parningsmetoden innebär att antalet datapunkter halveras, vilket kan ge ett något mindre robust regression (högre medelfel) än om glidande medelvärdesbildning används. Skillnaden i robusthet minskar dock då längre tidsperioder används.

7.1.3 Brukar- och driftbeteendets inverkan

Ett av huvudargumenten för att använda den undersökta energisignaturmetoden som ett komplement till gängse uppföljning av energiprestanda enligt BBR är att metoden är mer oberoende av brukarbeteendet (Andersson et al., 2010, Vesterberg 2014). Resultaten för de studerade byggnadsobjekten indikerar dock att både brukar- och driftbeteenden kan ha en indirekt påverkan på de från energisignaturen uppskattade prestandamåtten för lågenergihus. Driftbetingelser som ett igensatt FTX-filter fick t.ex. en tydlig påverkan på den uppskattade värmeförlusten för en av villorna. Brukarna styr hushållselanvändningen och personvärmen som i sin tur ger ett värmetilskott som minskar behovet av värme från värmesystemet. För

lågenergihus med låga värmeförluster via klimatskalet får osäkerheter i uppskattningen av spillvärme relativt sett större betydelsen än för hus med högre värmeförluster via klimatskalet. Resultaten för de studerade lågenergihusen indikerar t.ex. att månadsvärden för hushållselanvändningen är en för grov tidsupplösning, särskilt i villor där stora individuella variationer i elanvändningen kan förekomma. I flerbostadshus kan individuella variationer i viss mån utjämnas mellan lägenheter samtidigt som personvärme och spillvärme från hushållsel utgör en relativt sett mindre andel av värmebehovet. Även om månadsdata kan dygnsfördelas utifrån statistiska data för genomsnittlig hushållselanvändning, så fångar inte detta de eventuella korrelationer som kan finnas mellan hushållselanvändningen och temperaturskillnaden mellan inne och ute. För tillämpning av metoden på lågenergihus rekommenderas därför att hushållselanvändningen under den valda mätperioden uppskattas så att representativa dygnsmedelvärden erhålls.

I detta sammanhang ska särskilt uppmärksammas behovet av att via samtal med brukare följa upp eventuella förekomster av avvikande driftbeteenden som t.ex. att hushållsel används utanför klimatskalet, driftstörningar för installationer, vädring via fönster och dörrar och onormalt hög användning av spiskåpa under mätperioden. För lågenergivillorna finns t.ex. indikationer på att en del husägare värmer vindfånget, som är utanför klimatskalet, under den kallaste vinterperioden med en elradiator som belastar hushållselen. En sådan last skulle vara som störst vid stor temperaturskillnad mellan inne och ute och därmed bidra till att ”tippa” regressionslinjen så att den får en brantare lutning, dvs. den skulle bidra till en överskattning av värmeförluster genom klimatskalet. För att metoden ska fungera krävs att dylika laster som ligger utanför klimatskalet mäts separat så att de kan räknas bort från uppskattad nyttiggjord värme från elanvändning. På motsvarande sätt skulle t.ex. hög grad av vädring eller spiskåpeanvändning under den kallaste perioden kunna leda till en skev uppskattning av värmeförlusten.

7.2 Metodens praktiska tillämpning

En förutsättning för projektet var att undersökningarna skulle baseras på tidigare uppföljda lågenergihus och att inga nya mätningar skulle utföras inom projektet. För genomförandet var vi därmed beroende av att hitta lågenergihus med för projektet relevanta och genomförda uppföljningar och få tillgång till dessa data. Från avrapporterade SBUF- och LÅGAN-projekt tog vi fram en bruttolista över uppföljda lågenergihus som diskuterades med och kompletterades av medlemmar i referensgruppen under det första referensgruppmötet som hölls i samband med projektstart. Fastighetsägare med för projektet potentiellt intressanta uppföljda lågenergihus tillfrågades om vilka uppföljningar som fanns och möjligheterna för projektet att få tillgång till data. Utifrån det identifierades endast en handfull lågenergihus med för projektet relevanta mätdata med tillräcklig tidsupplösning. Tillgången till relevanta mätdata är idag alltså en begränsande faktor för metodens spridning och användning.

7.2.1 Tillgång till mätdata och metadata

En av nackdelarna med att inte arbeta med egna mätdata är att det kan vara svårt att få klarhet i vad mätningarna representerar, dvs. vad mäter installerade sensorer/mätare och med vilken

enhet? Att mätningar på ett byggnadsobjekt har skett betyder inte att mätningarna är uppföljningsbara och användbara för någon annan än de personer som ursprungligen genomförde mätningarna. För uppföljningsbarhet och användbarhet är metadata (information om vem, vad, när och hur data är insamlade) som säkerställer spårbarhet lika viktig som mätdata i sig. En annan nackdel med inte samla egna mätdata är att utförda mätningar inte alltid mäter det som är intressant för den aktuella undersökningen. I projektet mötte vi båda dessa utmaningar, vilket även påverkat projektets utfall. Mest påtaglig blev bristen på högupplösta data för hushållselanvändning under mätperioden, som introducerar osäkerhet i resultaten. De avvikelser mellan från energisignaturen uppskattade värmeförluster genom klimatskalet och projekterade värden som identifierades för villorna indikerar ett behov av fördjupade studier, avseende hushållselanvändningens samt brukar- och driftbeteendets inverkan. I detta sammanhang bör frågan om rättigheter till mätdata uppmärksammas då mätningar av hushållselanvändning och brukaruppföljningar kräver brukarnas medgivande och/eller medverkan.

Utifrån de genomförda undersökningarna rekommenderas att följande finns tillhands vid praktisk tillämpning av metoden för att uppskatta byggnadens totala värmeförlustfaktor eller värmeförluster genom klimatskalet mot uteluft:

- Mätdata med tillräcklig tidsupplösning för att uppskatta dygnsmedelvärden för relevanta termer innefattande:
 - Inom- och utomhustemperaturer
 - Använd effekt för uppvärmning via värmesystem
 - Använd effekt för hushållsel innanför klimatskalet (även om hushållselanvändningen föreföll vara oberoende av skillnaden mellan inom- och utomhustemperatur i detta arbete bör hushållselanvändningen mätas för att fånga upp en eventuell korrelation mellan elanvändningen och temperaturskillnaden till följd av t.ex. ”dold” elvärme som radiatorer i normalt uppvärmda utrymmen)
 - Använd effekt för driftel innanför klimatskalet (behövs endast om driftel förväntas bidra till byggnadens uppvärmning)
 - Använd effekt för varmvatten (behövs endast om varmvattenanvändningen förväntas bidra till husets uppvärmning via ackumulatörer, distribution eller användning innanför klimatskalet)
 - Tilluftsflöde och -temperaturer (behövs endast om separat bestämning av klimatskalets prestanda önskas)
 - Brukarrelaterad data som brukarnas antal och vistelsetider (behövs endast om detaljstudie avseende brukarbeteendets inverkan önskas)
 - Solinstrålning (behövs endast för kontroll av antagandet om försumbar solinstrålning)
- Mätdata från en period om 1,5-4 månader under den kallaste och mörkaste vinterperioden, helst en period symmetriskt runt vintersolståndet.

- Mätdata i W. Tillämpningen av metoden underlättas om uppmätt effekt för uppvärmning registreras i W och inte kWh för att undvika onödiga omräkningar.
- Metadata om mätdata inklusive anvisningar om vad olika sensorer/mätare mäter och med vilken enhet.
- Uppgifter om byggnadens tidskonstant (behövs endast om förbehandling enligt medelvärdesbildning önskas).

I praktiken behövs alltså mindre mätdata än vad som använts i föreliggande undersökning, såvida inte metoden ska användas för att uppskatta markförlusten.

7.2.2 Vilket mervärde ger metoden?

Metoden kräver tillgång till vissa data från mätningar som inte alltid görs om uppföljning sker i enlighet med Svebys rekommendationer för att kontrollera uppfyllelse av BBRs funktionskrav. Det gäller t.ex. mätdata för luftflöde och temperatur i tilluft som behövs om en separat analys av klimatskalets transmissionsförluster, inkl. luftläckage, mot uteluft önskas. Den kräver även tillgång till mätdata som kräver brukarnas medgivande, t.ex. dygnsmedelvärden för hushållselanvändning. De mätningar som behövs är i linje med vad som föreslås i Febys metod för mätning och verifiering av lågenergihus (Feby 2009), som dock har funnit begränsad användning i praktiken (hittills har två byggnader verifierats). Frågan om vilket mervärde metoden ger är därför berättigad.

Genom att analysera en byggnads energisignatur, där energisignaturen bestäms utifrån mätningar av använd värmeeffekt för uppvärmning som funktion av temperaturskillnaden över klimatskalet under en mörk och kall vinterperiod, är det möjligt att bestämma ett värmeförlustmått som bättre avspeglar själva byggnadens energiprestanda än det gängse måttet kWh/m²,år. Värmeförlustmättet kan t.ex. användas för att detektera avvikelser från projekterade värden. Om en avvikelse identifieras uppstår frågan om det är ventilationen eller klimatskalet som står för större/mindre värmeförluster än projekterat. Genom att via byggnadens energisignatur uppskatta både byggnadens totala värmeförlustfaktor (transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft) och värmeförluster enbart genom klimatskalet (transmissions- och luftläckageförluster mot uteluft) skulle avvikelserna kunna härledas till klimatskal respektive ventilationssystem.

I praktiken kan metoden därmed användas för att ta fram ett mått på klimatskalets effektiva U-värde (transmissionsförluster inklusive okontrollerat luftläckage). På så sätt är det möjligt att särskilja byggtreprenörens ansvarsområde från installationsentreprenörens när det gäller en byggnads energiprestanda. Metoden kan därmed utgöra ett komplement till gängse uppföljningar enligt Sveby som är tillämpligt för både äldre, mindre energieffektiva hus och lågenergihus. Vidare studier rekommenderas för att studera metodens tillämpbarhet i praktiken med hänsyn till behovet av mätdata för olika typer av hus och brukare. Undersökningarna som presenteras i föreliggande rapports huvuddel samt metodbeskrivningen i Bilaga A kan där utgöra ett stöd för att underlätta den insamling och analys av mätdata som metoden kräver.

Litteraturförteckning

- Andersson S., Sjögren J.-U., Östin R., Olofsson T. (2010) Prestanda- och beteendepåföljning av byggnaders energianvändning. Slutrapport till CERBOF och SBUF. Umeå: Umeå Universitet och NCC.
- Bagge H., Lindström L., Johansson D. (2012) Brukarrelaterad energianvändning: Resultat från mätningar i 1300 lägenheter. FoU-Väst rapport 1402. Göteborg: Sveriges Byggindustrier.
- Feby (2009) Metodrapport – Underlag för kriteriedokument. ATON rapport 0901, Juli 2009. Stockholm: Forum för energieffektiva byggnader (Feby).
- Hammarsten S. (1987) A Critical Appraisal of Energy-Signature Models. Applied Energy 26 (2) 97-110.
- Nordström G., Lidell S., Johansson H. (2012) Comparing energy signature analysis to calculated U-values in wooden houses in cold climate. I: Eco-Architecture IV. WIT Press, 9 s. (WIT Transactions on Ecology and the Environment; Nr 165).
- SCN (2012) Kravspecifikation för nollenergihus, passivhus och minienergihus: Bostäder. FEBY12. LTH rapport EBD-R-12/36/IVL rapport nr B 2027/ATON rapport 1201. Stockholm: Sveriges Centrum för Nollenergihus (SCN).
- Sjögren J.-U., Andersson S., Olofsson T. (2009) Sensitivity of the total heat loss coefficient determined by the energy signature approach to different time periods and gained energy. Energy and Buildings 41 (2009) 801-808.
- SS-EN ISO 13370:2007. Byggnaders termiska egenskaper – Värmeöverföring via marken – Beräkningsmetoder (ISO 13370:2007). Stockholm: SIS (Swedish Standards Institute).
- SS 24300-1:2011. Byggnaders energiprestanda – Del 1: Effektklassning av värmebehov. Stockholm: SIS (Swedish Standards Institute).
- Sveby (2012a) Brukarindata bostäder. Version 1.0, 2012-10-10. Stockholm: Sveby.
- Sveby (2012b) Mätföreskifter. Version 1.0, 2012-10-10. Stockholm: Sveby.
- Vesterberg, J. (2014) A regression approach for assessment of building energy performance. Institutionen för Tillämpad Fysik och Elektronik, Umeå Universitet.

Bilaga A: Metodbeskrivning Byggentreprenörens energisignatur

Byggentreprenörens energisignatur är en metod varmed en byggnads energiprestanda kan uppskattas för befintliga, bebodda byggnader. Metoden innebär att den totala värmeeffekt som används för att vidmakthålla olika värden på temperaturskillnaden över klimatskalet mäts och plottas i ett effekt-temperatur-diagram. Genom enkel linjär regression av erhållen punktmängd i diagrammet kan olika energiprestandamått för byggnaden bestämmas, varav denna beskrivning fokuserar på framtagandet av två värmeförlustmått som i huvudsak är oberoende av brukarbeteendet. Båda måtten beskriver byggnadens värmeförluster som en funktion av temperaturskillnaden mellan ute och inne.

Om prestandan hos byggnaden som system (inklusive klimatskal och ventilation) söks kan följande värmeförlustmått, båda med enheten W/K, användas:

- **Transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft, även kallad *total värmeförlustfaktor***

Måttet kan användas för att kontrollera bygg- och installationsentreprenadens utförande genom att jämföra uppmätt värde med summan av projekterad transmissions- och ventilationsförluster. De mätdata som krävs beskrivs i kap. 3.1-5 och kap. 3.8-10.

Om intresse finns att separera prestandan hos klimatskalet från prestandan hos ventilationssystemet och om mätdata för luftflöde och temperaturer i värmeåtervinningssystemet finns tillgängliga kan följande värmeförlustmått användas:

- **Transmissionsförluster inklusive luftläckageförluster mot uteluft**

Måttet kan användas för att kontrollera byggentreprenadens utförande genom att jämföra uppmätt värde med summan av projekterad transmissions- och luftläckageförluster. De mätdata som krävs beskrivs i kap. 3.1-4 och kap. 3.6-10.

Metoden kräver indata och mätinsatser motsvarande den för passivhus anpassade metoden för effektförlustmätning som beskrivs i Febys *Mätning och verifiering* (Feby 2009b, kap. 2).

Metoden är i första hand utvecklad för bostadshus. Dess tillämpning på lokalbyggnader har inte testats.

Innehållsförteckning

1. SYMBOLER OCH STORHETER.....	A3
2. MÄTPERIOD, MÄTINTERVALL OCH REGISTRERING AV MÄTDATA.....	A4
3. MÄTNING AV PARAMETERAR.....	A5
3.1 Tillförd värmeeffekt via värmesystem (P_v)	A5
3.2 Nyttiggjord värmeeffekt från varmvatten (βP_{vv})	A5
3.3 Nyttiggjord värmeeffekt från drift- och hushållsel (αP_{el}).....	A6
3.4 Nyttiggjord värmeeffekt från personer (P_p)	A6
3.5 Tillförd värmeeffekt via värmebatteri i luftbehandlingsaggregat (P_{lb})	A7
3.6 Tilluftsflöde (Q_t).....	A7
3.7 Tilluftstemperatur (T_t).....	A7
3.8 Inomhustemperatur (T_i).....	A8
3.9 Utomhustemperatur (T_e).....	A8
3.10 Solinstrålning	A8
4. BERÄKNING OCH ANALYS.....	A9
4.1 Förbehandling av mätdata	A9
4.1.1 Glidande medelvärdesbildning.....	A9
4.1.2 Parning.....	A9
4.2 Bestämning av prestandamått.....	A9
4.2.1 Transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft (total värmeförlustfaktor)	A10
4.2.2 Transmissionsförluster inklusive luftläckage mot uteluft.....	A10
4.2.3 Prestandamåttens robusthet	A10
5. METODENS TILLÄMPNING	A11
6. MER INFORMATION.....	A11
LITTERATURFÖRTECKNING	A12

1. Symboler och storheter

De huvudsakliga symboler och storheter som används i beskrivningen anges i tabell 1.

Tabell 1 Symboler, storheter och enheter.

Symbol	Storhet	Enhet
A_t	Sammanlagd omslutande area för klimatskalet mot uteluft, ovan jord	m^2
αP_{el}	Använd effekt för uppvärmning via elektricitet (α anger nyttjandegrad av totalt använd effekt för drift- och hushållsel, P_{el})	W
βP_{vv}	Använd effekt för uppvärmning via varmvatten (β anger nyttjandegrad av totalt använd effekt för varmvatten, P_{vv})	W
C_p	Luftens specifika värmekapacitet	Ws/kgK
F	Husets totala värmeförlustfaktor inkl. transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft	W/K
P_{lb}	Använd effekt för uppvärmning via värmebatteri i luftbehandlingsaggregat	W
P_M	Värmeförlust till mark	W
P_p	Nyttiggjord värmeeffekt från personer	W
P_v	Använd effekt för uppvärmning via värmesystem	W
Q_L	Luftläckageflöde genom husets klimatskal	m^3/s
Q_t	Tilluftslöde via husets ventilationssystem	m^3/s
ρ	Luftens densitet	kg/m^3
T_e	Utomhustemperatur	K
T_i	Inomhustemperatur	K
T_t	Tilluftstemperatur efter värmebatteri	K
U_t	Genomsnittligt U-värde för klimatskalet mot uteluft, ovan jord	W/ m^2K

2. Mätperiod, mätintervall och registrering av mätdata

Mätningar för parametrarna (kap. 3) bör ske samtidigt under en sammanhängande period av minst 6 veckor och max 4 månader runt vintersolståndet för att eliminera bidraget från solinstrålningen vid bestämning av prestandamått (se kap 3.10). Mätning kan ske innan byggnaden tagits i bruk, under förutsättning att byggnaden är uppvärmd, eller efter det att byggnaden helt eller delvis har tagits i bruk.

Mätningar ska ske med intervall så att representativa dygnsmedelvärden kan erhållas. Ett rimligt mätintervall är 10-15 min där minst timmedelvärden lagras.

Mätdata lagras och redovisas med information om placering av mätare/givare (flödesschema), typ av mätare/givare, mätschema (där tidpunkt och intervall för mätning framgår), kalibrerat uppmätt värde och enhet.

Mätare/givare ska vara kalibrerade vid mätperiodens början och ha en noggrannhet som minst motsvarar anvisningarna i Svebys *Handledning till Mätföreskrifter* kap. 2.3 (2012b, s. 10).

3. Mätning av parameterar

För att underlätta tillämpningen av metoden rekommenderas att mätningar av använd värmeeffekt registreras i watt (W) och inte kilowattimmar (kWh) som vanligen används för att mäta värmeanvändning i hus. Detta för att undvika onödiga omräkningar.

3.1 Tillförd värmeeffekt via värmesystem (P_v)

Mätning av tillförd värmeeffekt via värmesystem (P_v) ska ske separerat från använd effekt för driftel, varmvatten och värmebatterier i luftbehandlingsaggregat. Anvisningarna i Svebys *Handledning till Mätföreskrifter* kap 2.1.1 (2012b, s. 6) kan följas, med undantag för att data bör anges i W och inte i kWh. Mätning kan oftast ske i byggnadens undercentral, men om flera byggnader har en gemensam undercentral med gemensamma mätare behöver undermätare för varje byggnader installeras.

I vissa hus mäts flera parametrar, t.ex. värme- och varmvattenanvändning, med en gemensam mätare och undermätning måste då göras för att kunna separera ut tillförd värmeeffekt via värmesystem i enlighet med anvisningarna i Svebys *Handledning till Mätföreskrifter* kap 2.1.1 (2012b, s. 6).

3.2 Nyttiggjord värmeeffekt från varmvatten (βP_{vv})

Mätning av tillförd effekt för varmvatten (P_{vv}) ska ske separat från använd effekt för driftel, värmesystem och värmebatterier i luftbehandlingsaggregat. Anvisningarna i Svebys *Handledning till Mätföreskrifter* kap 2.1.3 (2012b, s. 7) kan följas.

Varmvatten kan bidra till husets uppvärmning via värmeförluster som sker i samband med beredning, distribution och användning. Samtidigt används också kallvatten som värms upp passivt innan det lämnar huset genom avloppet. Bidragets storlek beror därför på byggnads- och brukarspecifika faktorer som vattenflöde och -temperaturer, temperaturskillnad mellan vatten och inomhusluft, isolering av varmvattenledningen, ledningens längd samt förekomst av varmvattenackumulatorer och varmvattencirkulation (VVC). Nyttjandegraden (β) kan uppskattas utifrån den aktuella byggnadens förutsättningar och schablonvärden, se t.ex. schablonvärden framtagna inom Sveby och Feby i tabell 2.

Tabell 2 Schablonvärden för andel av använd effekt för olika varmvattenposter i bostadshus som kan nyttiggöras för uppvärmning under uppvärmningssäsong.

Varmvattenpost	Andel som kan nyttiggöras för uppvärmning	Källa
Total användning	20 %	Brukarindata bostäder Sveby (2012a, s. 21)
Beredning	100 % om ackumulator finns innanför klimatskalet 0 % om ackumulator finns utanför klimatskalet	Metodrapport Feby (2009a, s. 11)
Värmeförlust i VVC-system	100 % om ledningar är dragna innan för klimatskalet	Metodrapport Feby (2009a, s. 11)
Tappvarmvattenanvändning	0 % (avgiven värme från användning av varmvatten i byggnaden kan antas motsvara värmeförlusten via spillvatten) om avlopp ej är kopplat till värmeåtervinningssystem	Mätning och verifiering Feby (2009b, s. 23)

3.3 Nyttiggjord värmeeffekt från drift- och hushållsel (αP_{el})

Mätning av drift- och hushållsel ska ske separat och ska avse elanvändning innanför klimatskalet. El som används utanför klimatskalet (för t.ex. utebelysning, pumpar, motorvärmare, verktyg etc.) ska exkluderas genom separat mätning eller uppskattning i enlighet med Febys metod för *Mätning och verifiering* (2009b, s. 19-20). För mätning av driftel kan anvisningarna i Svebys *Handledning till Mätföreskrifter* kap. 2.1.4 (2012b, s. 7-8) följas, med tillägget att undermätning av olika driftelposter bör ske för att underlätta uppskattning av nyttiggjord värmeeffekt för uppvärmning. Mätning av hushållsel kan ske enligt Svebys *Handledning till Mätföreskrifter* §14 (2012b, s. 14), men för att metoden ska fungera är rekommendationen är att lagra minst timmedelvärden istället för månadsvärden (se kap. 2).

αP_{el} beräknas som summan av den nyttiggjorda värmen från hushållsel och olika delposter av driftel. Hur stor andel (α) av den totala elanvändningen innanför klimatskalet (P_{el}) som tillgodogörs för uppvärmning under uppvärmningssäsongen kan uppskattas utifrån schablonvärden för olika delposter, se t.ex. schablonvärdena framtagna inom Sveby och Feby i tabell 3.

Tabell 3 Schablonvärden för andel av använd effekt för olika elposter i bostadshus som kan nyttiggöras för uppvärmning under uppvärmningssäsong.

Elpost	Andel som kan nyttiggöras för uppvärmning	Källa
Hushållsel	70 %	Brukarindata bostäder Sveby (2012a, s. 25)
	80 % om evakuerande fläktar ej är kopplade till värmeåtervinningssystem (FTX eller FVP)	Metodrapport Feby (2009a, s. 12)
	85 % om evakuerande fläktar är kopplade till värmeåtervinningssystem (FTX eller FVP)	
Driftel – pumpar	100 %	Metodrapport Feby (2009a, s. 14)
Driftel – fläktar i tilluften	100 %	Metodrapport Feby (2009a, s. 12)
Driftel – fläktar i frånluften	80 % om fläktmotorn sitter före värmeåtervinningssystem (FTX eller FVP)	Metodrapport Feby (2009a, s. 12)
	0 % om fläktmotorn sitter efter värmeåtervinningssystem (FTX eller FVP)	
Driftel – belysning	100 % innanför klimatskal	Metodrapport Feby (2009a, s. 12)

3.4 Nyttiggjord värmeeffekt från personer (P_p)

Bidraget från personvärme till husets uppvärmning (P_v) är beroende av antalet brukare och deras vistelsetid innanför klimatskalet, typ av aktivitet, storlek, mm. Värmeavgivning från personer uppskattas utifrån schablonvärden framtagna inom t.ex. Sveby, se tabell 4.

Antalet brukare och vistelsetider bör uppskattas via enkäter eller intervjuer riktade till brukare av den aktuella byggnaden. För uppgift om antalet brukare kan även boendestatistik från den aktuella byggnadens ägare vara en möjlig källa. I de fall antal boenden och deras vistelsetider

i flerbostadshus inte är kända kan bidraget till uppvärmningen från personvärme uppskattats utifrån schablonvärden, se t.ex. schablonvärden framtagna inom Sveby i tabell 4. Svebys anvisningar anger normalvärden för brukarrelaterade indata som är avsedda att användas för energiberäkningar i enlighet med energihushållningskraven i BBR. Enskilda byggnader och brukare kan avvika från normalbeteendet. För småhus rekommenderas därför att byggnadsspecifika uppgifter inhämtas.

Tabell 4 Schablonvärden för bestämning av personvärme som kan nyttiggöras för uppvärmning under uppvärmningssäsong. Källa: Brukarindata bostäder (Sveby (2012a, s. 27-28).

Personvärme	Andel som kan nyttiggöras för uppvärmning					
Värmeeffekt	80 W/person					
Närvarotid	14 h/dygn/person					
Antal personer (flerbostadshus)	1 rk/rk	2 rk	3 rk	4 rk	5 rk	6+ rk
	1,42	1,63	2,18	2,79	3,51	3,51

3.5 Tillförd värmeeffekt via värmebatteri i luftbehandlingsaggregat (P_{1b})

System för värmeåtervinning via värmeväxlare eller värmepump har ibland ett värmebatteri som används om luftens temperatur efter en värmeväxlare (eller värmepump) är lägre än den önskade tilluftstemperaturen (T_t). För byggnader med värmeåtervinning är mätning av tillförd värmeeffekt från värmebatteri (P_{1b}) nödvändig för bestämning av total värmeförlustfaktor (enligt 4.2.1), men behövs inte för bestämning av transmissionsförluster inkl. luftläckageförlust (enligt 4.2.2). För byggnader utan värmeåtervinning är P_{1b} lika med noll.

3.6 Tilluftsflöde (Q_t)

Tilluftsflöde (Q_t) mäts vid nominell drift. Det är önskvärt att fast mätuttag för tilluftsflöde eller, för EC-fläktar, dokumentation på vilket luftflöde som olika styrspänning motsvarar finns tillgängligt i linje med Febys metod för *Mätning och verifiering* kap 1.3.2 (2009b, s. 6). Uppmätt tilluftsflöde kan även hämtas från injusteringsprotokoll för ventilationssystemet eller protokoll från OVK under förutsättning att flödena kan antas vara konstanta.

Kännedom om tilluftsflöde är nödvändig för bestämning av transmissionsförluster inkl. luftläckageförlust (enligt 4.2.2.). I de fall tilluftsflödet inte är känt kan endast bestämning av total värmeförlustfaktor ske (enligt 4.2.1).

3.7 Tilluftstemperatur (T_t)

Mätning av temperatur i tilluft (T_t) ska ske efter ev. värmebatteri i tilluftskanalen. Det är önskvärt att fast uttag för mätning av tilluftstemperatur utan störning från eftervärmare finns tillgängligt i linje med Febys metod för *Mätning och verifiering* kap 1.3.2 (2009b, s. 6).

Uppmätt tilluftstemperatur kan även hämtas från mätningar av verkningsgrad för värmeåtervinningssystemet. Kännedom om tilluftstemperatur är nödvändig för bestämning av transmissionsförluster inkl. luftläckageförlust (enligt 4.2.2.). I de fall tilluftstemperaturen inte är känt kan endast bestämning av total värmeförlustfaktor (enligt 4.2.1) ske.

3.8 Inomhustemperatur (T_i)

Mätning av byggnadens inomhustemperatur (T_i) ska ske så att en representativ medelinomhustemperatur för hela byggnadsvolymen innanför klimatskalet kan bestämmas.

Mätning kan göras genom att temperatur i frånluft (i gemensam frånluftskanal innan värmeväxlare och fläkt) mäts. Anvisningarna i Svebys *Handledning till Mätföreskrifter* §15 (2012b, s. 14) kan följas, med undantag för att data bör lagras som timmedel (enligt kap. 2) och inte som månadsmedel. Som alternativ eller komplement till mätning i frånluft kan inomhusluftens temperatur bestämmas genom att temperaturer i rumsluften mäts (t.ex. via styrsystemets rumstemperaturgivare). Beakta placeringen av temperaturgivare. I flervåningshus krävs mätare på varje våningsplan och i flerbostadshus helst minst en givare i varje lägenhet och trapphus.

I de fall inomhustemperaturen inte är känd kan prestandamåttan bestämmas genom en linjär anpassning av totalt använd värmeeffekt mot utomhustemperaturen. En sådan bestämning baseras på ett antagande om att inomhustemperaturen är konstant under den analyserade perioden, vilket inte alltid är en acceptabel approximation av verkligheten.

3.9 Utomhustemperatur (T_e)

Mätning av utomhustemperatur (T_e) bör ske lokalt i den aktuella byggnadens närhet. Beakta placeringen av temperaturgivare. Temperaturmätningen påverkas t.ex. av strålningsvärme från byggnader, solinstrålning och nederbörd.

I de fall utomhustemperaturen lokalt vid aktuell byggnad inte är känd kan värden hämtas t.ex. från SMHIs närmaste mätstation (se www.smhi.se).

3.10 Solinstrålning

För att kontrollera antagandet om att solinstrålningens bidrag kan försummas bör mätning av direkt eller global solinstrålning (summan av diffus och direkt solinstrålning) ske lokalt vid den aktuella byggnaden. I de fall direkt eller global strålningen vid aktuell byggnad inte är känd kan indikativa värden hämtas från t.ex. SMHIs närmaste mätstation (se www.smhi.se). Om sådana mätdata saknas rekommenderas att endast använda mätdata från perioden november-februari eftersom solinstrålningen är som lägst vid tiden för vintersolståndet. Som tumregel kan antas att solinstrålningens bidrag till en byggnads uppvärmning i landets klimatzoner framförallt är betydelsefull under perioden mars-oktober.

4. Beräkning och analys

För att genomföra beräkning och analys enligt metoden krävs kunskaper om statistisk analys genom linjär regression. Vid osäkerhet rekommenderas att t.ex. energikonsult kontaktas.

4.1 Förbehandling av mätdata

För att erhålla en god uppskattning av värmeförlustmåten för klimatskalet bör bidraget från värmelagring till byggnadens uppvärmning vara försumbart lågt eller vara oberoende av differensen mellan inomhus- och utomhustemperaturen. För att minimera inverkan från värmelagring kan mätdata för parametrarna i kap. 3 förbehandlas genom två alternativa metoder: glidande medelvärdesbildning eller parning. Förbehandlingen reducerar även inverkan från andra parametrar som inte tydligt varierar med temperaturskillnaden över klimatskalet, t.ex. brukare, slumpmässiga mätfel och i viss mån solinstrålning.

Glidande medelvärdesbildning rekommenderas som första alternativ eftersom metoden i de flesta fall leder till en mer robust uppskattning av värmeförlustmåten eftersom fler datapunkter behålls till analysen. Parning rekommenderas som alternativ till glidande medelvärdesbildning för tunga byggnader (Andersson et al., 2010) samt för mätperioder där solens bidrag ej helt kan försummas (sådana perioder bör dock i möjligaste mån undvikas), för byggnader vars tidskonstant inte är känd och i de fall mätdata uppvisar tids-/säsongsbberoenden (Lidelöw och Flodberg Munck, 2015).

4.1.1 Glidande medelvärdesbildning

Metoden innebär att medelvärdet av alla värden inom ett viss tidsintervall som är längre än byggnadens tidskonstant beräknas så att medelvärdet kan förändras när intervallet flyttas (eller glider) framåt i tiden. Exempelvis kan ett glidande medelvärde för en byggnad med tidskonstanten 3 dygn beräknas genom att först medelvärdesbilda de tre första dygnens medelvärden, sedan lägga till nästa dags medelvärde och dra ifrån det första dygnets medelvärde och beräkna ett nytt medelvärde, och fortsätta så till slutet av den aktuella tidsperioden.

4.1.2 Parning

Metoden som kallas parning är utvecklad inom CERBOF/SBUF-projektet ”Prestanda- och beteendeuppföljning av byggnaders energianvändning” och beskrivs i projektets slutrapport, se Andersson et al. (2010, s. 20-22 och Bilaga 1). Metoden baseras på en uppskattning av temperaturförändringen i byggnadens termiska massa, där både klimatskal och intern termisk massa beaktas, mellan två konsekutiva dagar. Utifrån beräknad temperaturförändring sorteras datamängden så att två dygn med jämförbara absolutbelopp men motsatt tecken (dvs. ökning respektive minskning i lagringstemperatur) ”paras” genom att beräkna medelvärdet av dagarnas temperaturförändring.

4.2 Bestämning av prestandamått

Under förutsättning att mätdata enligt kap. 2 och kap. 3 finns tillgängliga för den aktuella byggnaden och att mätdata har förbehandlats enligt någon av metoderna i kap. 4.1 kan bestämning av två alternativa värmeförlustmått ske utifrån en förenklad effektbalans. Den huvudsakliga förenklingen består i att inverkan från klimatfaktorer som luftfuktighet och vind ej beaktas.

4.2.1 Transmissions- och ventilationsförluster mot uteluft (total värmeförlustfaktor)

Utgångspunkten för att bestämma den totala värmeförlustfaktorn (F) är en förenklad effektbalans:

$$P_v + \alpha P_{el} + \beta P_{vv} + P_{lb} + P_p = F(T_i - T_e) + P_M \quad (1)$$

Om effekt- och temperaturparametrarna i ekv. 1 är kända kan den totala värmeförlustfaktorn (F) uppskattas genom enkel linjär regression under antagandet att P_M är relativt konstant under den analyserade tidsperioden. F bestäms då som regressionslinjens lutning, medan P_M motsvarar värdet där regressionslinjen skär y-axeln under förutsättning att regressionslinjen bedöms beskriva variationerna i totalt använd värmeeffekt tillräckligt väl (se kap 4.2.3).

P_M som uppskattas genom regression utifrån ekv. 1 motsvarar i teorin värdet på värmeförlusten mot mark i den aktuella byggnaden (vilket kan kontrolleras med beräkningar enligt SS-EN ISO 13370:2007). I praktiska tillämpningar avviker dock ofta den uppskattade P_M något från beräknat värde på markförlusten. Detta förklaras av att den uppskattade P_M påverkas av osäkerheter i parametrar på ekvationens vänstra sida såsom nyttiggjord värme från el, varmvatten och personer (som delvis baseras på konstanta schablonvärden), systematiska mätfel, samt ej beaktade förlustertermer med icke-stokastiskt beteende (t.ex. använd värme för uttorkning av byggfukt under de första åren av en byggnads livstid).

4.2.2 Transmissionsförluster inklusive luftläckage mot uteluft

För byggnader med balanserat från- och tilluftsflöde gäller att:

$$P_v + \alpha P_{el} + \beta P_{vv} + P_p - Q_L \rho C_p (T_i - T_L) = (UA_t + Q_L \rho C_p) (T_i - T_e) + P_M \quad (2)$$

Om effekt- och temperaturparametrarna i ekv. 2 är kända kan transmissionsförluster inklusive luftläckageförluster ($UA_t + Q_L \rho C_p$) mot uteluften uppskattas genom enkel linjär regression under antagandet att P_M är relativt konstant under den analyserade tidsperioden. ($UA_t + Q_L \rho C_p$) bestäms då som regressionslinjens lutning, medan P_M motsvarar värdet där regressionslinjen skär y-axeln under förutsättning att regressionslinjen bedöms beskriva variationerna i totalt använd värmeeffekt tillräckligt väl (se kap 4.2.3).

Se kommentar om P_M i sista stycket under kap. 4.2.1.

4.2.3 Prestandamåttens robusthet

Robustheten (precisionen) i uppskattningen av värmeförlustmått via regressionsanalys är framförallt beroende av den linjära anpassningens fel jämfört med mätdata. Systematiska eller konstanta fel påverkar företrädesvis regressionslinjens skärning med y-axeln (dvs. P_M i ekv. 1 och ekv. 2). Inverkan från stokastiska mätfel, som kan påverka regressionslinjens lutning (dvs. F i ekv. 1 eller $(UA_t + Q_L \rho C_p)$ i ekv. 2), kan reduceras avsevärt genom förbehandling av mätdata enligt kap. 4.1.

Det finns inget universellt mått på vad som är en robust uppskattning, men åtminstone två statistiska mått bör beaktas:

- Den linjära anpassningens förklaringsgrad (R^2), som beskriver hur väl den linjära anpassningen förklarar relationen mellan totalt använd värmeeffekt och

temperaturskillnad över klimatskalet. Det finns inget minimivärde på R^2 , men värden större än 75% anges ofta som ett riktvärde för bra regressionsmodeller.

- Medelfelet (procentuell avvikelse), som beskriver spridningen i det erhållna värmeförlustmålet (dvs. medelvärdet för lutningen på regressionslinjen). Ju mindre fel, desto mer robust uppskattning av värmeförlustmålet erhålls. Erfarenhetsmässigt är medelfelet för robusta uppskattningar mindre än 5%.

Om R^2 för den erhållna regressionslinjen är lägre än 75% eller om medelfelet är större än 5% rekommenderas vidare analyser med t.ex. andra mätperioder och andra metoder för förbehandling.

5. Metodens tillämpning

De bestämda värmeförlustmåten beskriver byggnadens värmeförluster som en funktion av temperaturskillnaden mellan ute och inne och kan användas för att:

- Jämföra uppmätta värmeförluster med projekterade för att kunna detektera avvikelser. Om avvikelser identifieras uppstår frågan om det är ventilationen eller klimatskalet som står för större/mindre värmeförluster än projekterat. För att kunna härleda avvikelserna till klimatskal respektive ventilationssystem krävs mätningar av tilluftsluftflöde och -temperatur och beräkningar enligt kap. 4.2.2 vilket ger ett bättre mått på själva byggnadens prestanda, dvs. det som byggherren ansvarar för, än bestämning av total värmeförlustfaktor enligt 4.2.1.
- Beräkna byggnadens årsenergibehov baserat på en uppmätt värmeförlustfaktor för jämförelse med projekterat årsenergibehov.
- Jämföra olika byggnaders energiprestanda eller följa förändringar i en byggnads energiprestanda över tid. De här beskrivna värmeförlustmåten avspeglar själva byggnadens energiprestanda på ett mer entydligt sätt än det gängse nyttjade energiprestandamåten, kWh/m²,år, som i högre grad beskriver brukarbeteendet. De kan därför användas som ett komplement till kWh/m²,år för att ge en bättre bild av energiprestandan hos såväl byggnaden som brukarna.

Det är inte problemfritt att beräkna värmeförlustmåten baserat på mätdata från endast en delmängd av den tillförda energin. För större flerbostadshus kan det vara rimligt att använda generella brukarprofiler för t.ex. hushållsel och personvärme, men för småhus kan generella profiler ge relativt stora fel. För att noggrannare kunna bestämma värdet på en byggnads värmeförlustfaktor krävs mätdata med god tidsupplösning (timmedelvärden) för inomhustemperatur, hushållsel samt information om antal brukare och deras vistelsetider.

6. Mer information

För fördjupad inläsning om bakgrunden till den energisignaturmetod som beskrivits ovan rekommenderas:

Andersson, S., Sjögren, J.-U., Östin, R., Olofsson, T. (2010) Prestanda- och beteendeuppföljning av byggnaders energianvändning. Slutrapport till CERBOF och SBUF. Umeå: Umeå Universitet och NCC.

Lidelöw, S., Flodberg Munck, K. (2015) Byggtreprenörens energisignatur. SBUF-rapport, Augusti 2015.

Sjögren, J.-U. (2007) Energy Performance of Multifamily Buildings - Building Characteristic and User Influence. Institutionen för Tillämpad Fysik och Elektronik, Umeå Universitet.

Vesterberg, J. (2014) A regression approach for assessment of building energy performance. Institutionen för Tillämpad Fysik och Elektronik, Umeå Universitet.

Litteraturförteckning

Andersson, S., Sjögren, J.-U., Östin, R., Olofsson, T. (2010) Prestanda- och beteendepåföljning av byggnaders energianvändning. Slutrapport till CERBOF och SBUF. Umeå: Umeå Universitet och NCC.

Feby (2009a). Metodrapport – Underlag för kriteriedokument. ATON rapport 0901, Juli 2009. Stockholm: Forum för energieffektiva byggnader (FEBY).

Feby (2009b). Mätning och verifiering – Underlag för kriteriedokument för Passivhus och Minienergihus. ATON rapport 0904, Juli 2009. Stockholm: Forum för energieffektiva byggnader (FEBY).

Lidelöw, S., Flodberg Munck, K. (2015) Byggtreprenörens energisignatur. SBUF-rapport, Augusti 2015.

SS-EN ISO 13370:2007. Byggnaders termiska egenskaper – Värmeöverföring via marken – Beräkningsmetoder (ISO 13370:2007). Stockholm: SIS (Swedish Standards Institute).

Sveby (2012a). Brukarindata bostäder. Version 1.0, 2012-10-10. Stockholm: Sveby.

Sveby (2012b). Handledning till Mätföreskrifter. Version 1.0, 2012-10-10. Stockholm: Sveby.