



Långtidsuppföljning av energianvändning i lågenergihus



Långtidsuppföljning av energianvändning i lågenergihus

Studie av hushållens beteende

Berndt Lundgren, KTH



Energimyndighetens projektnummer: xxxxx-xx

E2B2



Förord

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

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

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

Långtidsuppföljning av energianvändning i lågenergihus är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Projektet har leddes av Tekn. Dr Berndt Lundgren, KTH som har genomförts i samverkan med Svenska Bostäder.

En långtidsuppföljning i lågenergihuset Blå Jungfrun i Stockholm visar att energiförbrukningen var lika hög som i traditionellt producerade hus. Detta trots att alla lägenhetsinnehavare hade smarta mätare. Även andra lågenergihus visar att energianvändningen ofta är högre än vad man kalkylerat. I detta projekt kommer man därför att undersöka den datamängd som producerats under den tid som energimätningen pågick. Det i sin tur ska leda till att förklara varför det var så och till bättre beräkningsmetoder.

Stockholm, 31 oktober 2018

Anne Grete Hestnes,

Ordförande i E2B2

Professor vid Tekniskt-Naturvetenskapliga Universitet i Trondheim, Norge

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



Sammanfattning

Forskningsprojektet *"långtidsuppföljning av energianvändning i lågenergihus"* är en studie av hushållens beteende beträffande energianvändning och omfattar tre delprojekt i passivhusprojektet Blå Jungfrun i Farsta utanför Stockholm, benämnda DP 1–DP 3 i texten. Det första delprojektet undersöker varför visualisering av förbrukning av elektricitet inte resulterade i lägre energiförbrukning. Beror detta på att intresset inte riktigt fanns utan livsstil och attityder påverkar mer än information? För att ge svar på frågan varför information inte fick avsedd effekt har vi studerat om hushåll som tror sig ha ett energi-effektivt-beteende också har lägre förbrukning av elektricitet. Tanken med information är att den ska öka medvetenheten om energiförbrukning för att sedan leda till energibesparingar. Våra resultat visar att så inte är fallet utan hushållen är konsistenta i sin uppfattning som priskänsliga, följa sin elförbrukning och uppgradera till lågenergiprodukter, men detta leder inte till att de har lägre energiförbrukning jämfört med dem som säger att de inte bryr sig. Det andra delprojektet undersöker om det finns skillnader mellan hushållen i Blå Jungfrun och konventionella flerbostadshus med avseende på hushållens självskattade energi-effektiva beteende och deras förbrukning av elektricitet. Vi finner att hushållen i passivhusen tror sig ha en högre energi-effektivt beteende jämfört med konventionella lägenheter, vilket borde leda till att de också har lägre energiförbrukning, men så är inte fallet utan det finns ingen signifikant skillnad i elförbrukning.

Det tredje delprojektet syftar till att pröva statistiska metod som kan ge effektiva statistiska analyser av de enorma mängder data som genereras genom att allt fler sensorer byggs in i våra byggnader. För att undersöka detta använder vi förbrukningsdata mellan 2010-2015 från Svenska Bostäders passivhus projekt Blå Jungfrun i Farsta. Funktionell dataanalys med Fourier serier visar att det finns lika många förbrukningsprofiler som det finns hushåll. Ingen förbrukningsprofil är den andre lik. Klusteranalysen som utförts tillsammans med regression och Fourieranalys visar hur det är möjligt att tolka förbrukningsmönster som inte är synliga för ögat.

Mot bakgrund av information om förbrukning inte verkar medföra någon större påverkan på hushållens beteende föreslår vi att betalningsmodellen förändras så att elektricitet inte betalas i efterskott utan i förskott, vilket har stöd i modern beteende ekonomisk teori. Grova uppskattningar av



effekten av förbetald el för hushållsel visar på en inbesparings potential av cirka 2,4-3,6 TWh som kan användas för till exempel att ladda elbilars batterier. Inbesparingspotentialen blir större om vi inkluderar villaägare som värmer bostaden med elektricitet. Med ledning av våra resultat rekommenderar vi en förstudie som kan öka kunskaper för effekterna av förbetald elektricitet ur ett ekonomiskt, juridiskt och tekniskt perspektiv men även klusteranalyser som baseras på funktionell dataanalys med Fourier serier för att tydliggöra faktiska brukarbeteenden.

Nyckelord: Smarta mätare, Visualisering av mät data, Debiteringsmodeller, Långtidsanalys, Blå Jungfrun.



INNEHÅLL

1	INLEDNING	9
1.1	BAKGRUND	9
1.1.1	LEDER ENERGIVISUALISERING TILL LÄGRE FÖRBRUKNING AV ELEKTRICITET?	10
1.1.2	HAR HUSHÅLL BOENDE I PASSIVHUS LÄGRE ENERGIFÖRBRUKNING JÄMFÖRT MED BOENDE I KONVENTIONELLA FLERBOSTADSHUS?	12
1.1.3	ANALYSER AV FÖRBRUKNING AV ELEKTRICITET OCH OLIKA BETEENDEGRUPPER	12
1.2	ORGANISATION	12
2	GENOMFÖRANDE	14
2.1	UTVECKLING AV DSEM MODELLEN	14
2.1.2	GENOMFÖRANDET AV DSEM STUDIEN	16
2.2	SKILLNADER MELLAN BOENDE I PASSIVHUS OCH KONVENTIONELLA LÄGENHETER	17
2.3	ANALYSER AV FÖRBRUKNING AV ELEKTRICITET OCH OLKA BETEENDEGRUPPER	18
3	RESULTAT	19
3.1	EFFEKTER AV INKOMSTER OCH PRIS PÅ ETT ENERGI-EFFEKTIVT BETEENDE	19
3.2	SKILLNADER MELLAN BOENDE I PASSIVHUS OCH KONVENTIONELLA LÄGENHETER	20
3.3	ANALYSER AV FÖRBRUKNING AV ELEKTRICITET OCH OLKA BETEENDEGRUPPER	20
4	DISKUSSION	22
4.1	DET RÄCKER INTE MED INFORMATION FÖR ATT BRYTA INVÄNDA MÖNSTER	22
4.2	BETEENDE EKONOMI VISAR VÄGEN FRAMÅT FÖR ATT REDUCERA ELFÖRBRUKNING	23
4.3	SKILLNADER MELLAN BOENDE I PASSIVHUS OCH KONVENTIONELLA LÄGENHETER	24
4.4	ANALYSER AV FÖRBRUKNING AV ELEKTRICITET OCH OLKA BETEENDEGRUPPER	24
4.5	REKOMMENDATIONER	26
5	PUBLIKATIONSLISTA	27
	REFERENSER	28



BILAGOR

30



Figur 1. Svenska bostäders SBOX med förbrukningsdata.

Redan efter några år visade det sig att energiförbrukningen i form av varm- och kallvatten samt elektricitet på fastighetsnivå inte skiljde sig från konventionella flerbostadshus. Trots att Svenska Bostäder under pilotprojektet har individuell debitering av varm- och kallvatten, hushållsel och kompletteringsvärme i efterskott. Den slutsats som drogs var att den höga energiförbrukningen beror på att hushållen inte var tillräckligt motiverade att följa sin förbrukning och reducera den. När installationen av smarta mätare inte resulterade i lägre varmvatten- och energiförbrukning avbröts implementeringen av smarta mätare i pilotprojektet varvid mätarna monterades ned. Observera att nedan följer redovisningen av tre olika delprojekt benämnda DP 1-DP 3.

1.1.1 DP 1: Leder energivisualisering till lägre förbrukning av elektricitet?

Vi har i forskningsprojektets första del valt att utgå från erfarenheter som gjorts i Svenska Bostäders passivhus projekt Blå Jungfrun och ställer oss frågan: varför resulterade inte energivisualisering med SBOX i en lägre energiförbrukning? Andra forskningsprojekt inom E2B2 påvisar problem med implementering av smarta elnät exempelvis *Framtidsgränd – hållbara livsstilar*, där bidragande orsaker till den uteblivna användningen av det smarta elnätet berodde på att hushållen uppvisade alltför låg motivation för att nyttjande av dessa skulle uppstå. Likande erfarenheter kommer från E2B2 projektet *Smarta elnät – för vem?* där elproducenter och elnätsföretag har en alltför teknisk och deterministisk syn på hushållens förmåga att anpassa sig till tekniska lösningar. Utvecklare av



tekniken sätter inte användarens behov och livsmönster i fokus därför uppstår ett glapp mellan förväntningar på hushållens användning av tekniken och hushållens beteende. Internationella studier av smarta mätare och visualisering av förbrukningsdata visar på olika resultat beroende på hur studier har genomförts och hur många hushåll som ingått i studien. Inbesparingspotentialen av elektricitet med smarta mätare och så kallade in-house-displays var i dessa studier mellan 1,5-6,0 procent. (Ehrhardt-Martinez & Donnelly & Laitner, 2010; RAND Europé, 2012). Gilbert & Graff Zinvin (2014) har studerat hur länge information om förbrukningen av elektricitet leder till en reducerad förbrukning innan förbrukningen ökar igen. Deras resultat visar att förbrukningen sjunker med 0,6-1,0 % första veckan i samband med att informationen ges om kostnaden via räkningar för att sedan återgå till den ursprungliga förbrukningsnivån. Information om förbrukning har alltså ett kort bäst före datum. Vi behöver veta mera om varför det är så för att långsiktigt förändra hushållens beteende.

För att besvara frågan varför information inte leder till mera varaktig beteendeförändring behöver vi bredda analysen till att också omfatta priset för elektricitet och hushållens inkomster. Vi kommer att undersöka hur stor påverkan inkomster, priset och ett självskattat energi-effektivt¹ beteende har på förbrukningen av hushållselektricitet genom att använda en dynamisk strukturekvationsmodell (Asparouhov., Hamaker & Muthen, 2018). Den statistiska metoden möjliggör kombination av beteendedata och longitudinell förbrukningen av elektricitet för att studera hur ett självskattat energi-effektivt beteende påverkar förbrukningen, se bilaga 1, tabell 1 och bilaga 2, tabell 2. Påverkar inkomsten, priset och information om förbrukningen av elektricitet att hushållen vidtar olika energibesparande handlingar som att släcka belysningen eller att uppgradera till lågenergiprodukter?

För att göra undersökningen möjligt har vi samarbetat med Ellevio AB som efter medgivande av hyresgäster lämnat månatliga förbrukningsdata av hushållselektricitet mellan 2010-2017.

¹ Med energi-effektivt beteende menas exempelvis att övervaka sin energiförbrukning, släcka tomma rum, uppgradera till lågenergiprodukter.



1.1.2 DP 2: Har hushåll boende i passivhus lägre energi-förbrukning jämfört med boende i konventionella flerbostadshus?

Nästa fråga som vi undersöker är om det finns skillnader i förbrukning av hushållselektricitet mellan hushållen boende i passivhusen Blå Jungfrun jämfört med hushåll boende i konventionella flerbostadshus, beroende på om hushållen anser sig vara energi-effektiva eller inte. För att besvara frågan använder vi enkäten från delprojekt 1, se bilaga 1, tabell 1. Den statistiska analysen utförs här med principal-komponentanalys och ANOVA².

1.1.3 DP 3: Analyser av förbrukning av elektricitet och olika beteendegrupper

I forskningsprojektets sista och tredje del arbetar vi med att analysera och verifiera hushållens förbrukning av varmvatten och kompletteringsvärme genom att använda data från Blå Jungfrun där förbrukningen av kall- och varmvatten, hushållsel samt kompletteringsvärme registrerats varje timme mellan 2010-2015. Här är vår ambition att visa hur stora mängder av energidata kan analyseras för att förstå vad som påverkar energiförbrukningen hos olika hushåll samt testa hur vi kan göra prediktioner av förbrukning av elektricitet med hjälp funktionell dataanalys och Fourier serier (Febrero-Bande, & Oviedo de la Fuente, 2012). Vår ambition är här att visa hur det är möjligt att med avancerad statistisk modellering predicera förbrukningen av varmvatten och kompletteringsvärme beroende på brukarnas faktiska beteende, lägenhetens placering i bostadshuset och variationer i utomhustemperaturen. Vi använder klusteranalys för att visa hur det är möjligt att utföra beteendeanalyser för att möjliggöra analyser av olika grupper förbrukning av elektricitet.

1.2 ORGANISATION

Projektledare för projektet har varit KTH, Tekn Dr Berndt Lundgren, Medverkande i projektet har varit Tekn Dr Agnieszka Zalejska Jonsson från KTH samt Dr Shaobo Jin och Mårten Schultzberg doktorand. Shaobo och Mårten kommer från Statistiska Institutionen, Uppsala Universitet. Projektet bedrivs tillsammans med Svenska Bostäders ledning genom Allan Leveau, nybyggnadschef och Karin Ståhl, projektledare för Blå Jungfrun samt Johanna Nordström, gruppchef gröna affärer, Skanska. Göran Frendin, Fortum deltar också i projektets referensgrupp. Under projektets gång har fem möten hållits med styrgruppen för att bistå med information om projektet Blå Jungfrun. Med stöd av Ellevio AB,

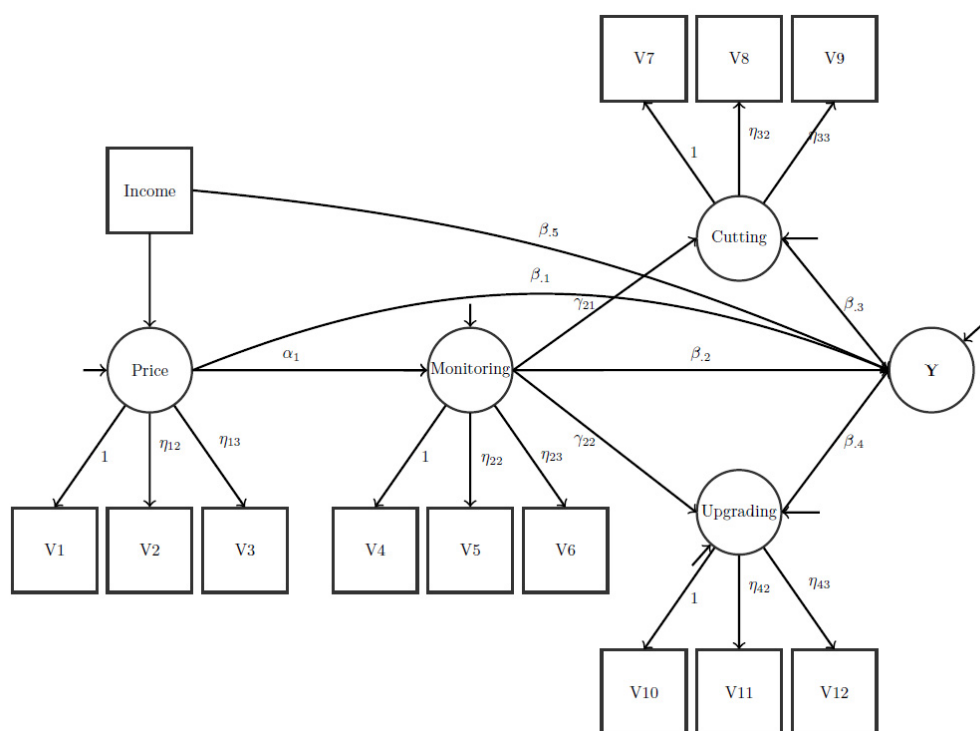
² ANOVA står för Analysis of Variances.



Mårten Granfors har projektet fått tillgång till data för förbrukningen av hushållsel mellan 2007-2017 som möjliggjort långtidsstudie av hushållsel i konventionella flerbostadshus i Hässelby/Vällingby byggda från 2005 -2010 ägda och förvaltade av Svenska Bostäder.



För att förklara hur ett energi-effektivt beteende påverkar förbrukningen av elektricitet har vi använt Nobel pristagaren Thaler & Shefrin teori om ekonomisk självkontroll (1981). Den statistiska modellen som vi använder för att analysera hushållens beteende bygger på Thaler & Shefrin teori och utgörs av en dynamisk strukturekvations modell (Asparouhov, Hamaker & Muthén, 2018) där det empiriska ramverket utgörs av enkätstudien, se bilaga 1 och figur 2.



Figur 2. Dynamisk strukturekvationsmodell för att analysera hur inkomst och pris på elektricitet påverkar ett energi-effektivt beteende och förbrukningen av elektricitet. Enkätfrågor som använts i studien återfinns i bilaga 1.

Så här tolkas modellen i figur 2: Relationer mellan två faktorer har en riktning från en faktor till en annan faktor, vilket visar hur effekten av en faktor påverkar den andra faktorn. Den riktning som anges kan vara positiv vilket betyder att effekten ökar i positiv riktning när den första faktorn förändras ett skalsteg. På motsvarande vis förhåller sig en relation som har ett negativt tecken. Relationen kan också vara signifikant vid en viss konfidensnivå exempelvis ett 95 % konfidensintervall vilket är vanligt i



vetenskapliga sammanhang. När relationen är signifikant har vi funnit ett statistiskt samband mellan två faktorer. På samma vis tolkas en relation som inte är signifikant men då med slutsatsen att vi inte kan påvisa att effekten existerar inom det valda konfidensintervallet. Modellen anger också en direkt effekt från en faktor till en annan faktor exempelvis från faktorn "inkomst" till faktorn kWh (Y) som är den månatliga förbrukningen av hushållselektricitet³. Det finns också en indirekt effekt vilken existerar mellan faktorn "inkomst" och "pris" samt övriga faktorer. Det betyder att det finns två vägar som effekten kan ta den mellan "inkomst" och förbrukningen av hushållselektricitet (Y) och den mellan "inkomst" och "pris" samt via samtliga övriga faktorer i modellen. Vi är alltså intresserade av att förstå hur inkomsten och priskänslighet påverkar förbrukningen av hushållsel direkt och indirekt. Om vi valde att endast studera den direkta effekten så fångar vi inte upp beteendet för olika priskänsliga hushåll. Dvs vi tror att priset på elektricitet påverkar förbrukningen av elektricitet men att inkomsten har en avgörande betydelse för hur hushållet väljer att förbruka elektricitet.

Enligt Thaler & Shefrin teori påverkas ett sparande av hur väl en "planner" kan kontrollera hur en "doer", båda existerande i samma person, kortsiktigt konsumerar eller sparar beroende på personens preferenser, incitament eller genom att följa uppsatta regler. I överensstämmelse med Thaler & Shefrin teori har vi modellerat att inkomsten och priset på elektricitet påverkar en person att läsa räkningar och följa sin energiförbrukning över tiden vilket leder till energibesparande åtgärder som "stänga av" eller "uppgadera".

I modellen utgår vi således från att hushållet påverkas av priset på elektricitet givet inkomsten för att sedan att läsa elräkningen och följa sin energiförbrukning, se figur 2, sidan 15. Vi utgår också från att personer läser räkningar och stänger ned TV, datorer och belysningen när rum lämnas tomma och uppgaderar till lågenergi produkter när äldre byts ut. Det är personens egna uppfattning av sitt beteende som mäts via EBB-scale, se bilaga 1.

³ Med hushållsel avses elektricitet som förbrukas av hushållet i lägenheten exempelvis kyl- och frys, spis, TV, dator, belysning och hushållshjälpmedel.



2.1.2 Genomförandet av DSEM studien

För att få en förklaring till varför hushållen i Blå Jungfrun har lika hög förbrukning av varmvatten och elektricitet som hushåll i konventionella bostadshus valde vi att studera hushåll där en intervention inte har skett. Det är förenligt med god forskningssed att inte använda samma population i en forskningsstudie för att både undersöka och förklara företeelsen. Av den anledningen sökte vi hushåll boende i flerbostadshus byggda mellan 2005-2010 i Vällingby och Hässelby området i Stockholm kommun. Genom att utföra studien i Hässelby/Vällingby området erhöll vi 102 kompletta enkäter av 520 utskickade enkäter. Kompletta förbrukningsdata av hushållsel per månad och hushåll erhöles mellan 2010-2017 av Ellevio AB. Ett introduktionsbrev sändes ut för att förbereda hushållen på studien med förfrågan om ett deltagande i en webundersökning. Hushållen lämnade ett skriftligt godkännande att Ellevio AB fick lämna ut deras förbrukningsdata till KTH via ett särskilt medgivande avtal. Till hushåll som önskade delta i studien sändes en webbenkät, men även pappers enkäter sändes ut till dem som så önskade. Tre påminnelser sändes ut under oktober, november och december 2017.

2.2 DP 2: Skillnader mellan hushåll i passivhus och konventionella lägenheter

För att fastställa om det finns signifikanta skillnader i energi-effektivt beteende mellan boende i Blå Jungfrun och hushåll boende i konventionellt byggda flerbostadshus har vi undersökt detta med principalkomponent analys⁴ och t-tester. Är det så att skillnader mellan hushållens uppfattning av energi-effektivitet påverkar deras förbrukning av hushållselektricitet? För att besvara den frågan har vi undersökt detta med hjälp av ANOVA⁵. Resultaten finns i bilaga 3, tabell 3 och bilaga 4, tabell 4. Den multivariata statistiska analysen visade att det fanns fyra faktorer; "priskänslig", "övervaka", "uppgradera" och "stänga av" (Kaiser test, 0,641 visade att data har möjlighet att bilda faktorer). För att fastställa om frågor som ingår i respektive faktor är konsistenta mot den föreslagna faktorn användes Cronbachs Alpha. Vi erhöles följande värden: "priskänslig" (0,74), "övervaka" (0,86), "uppgradera" (0,66) och "stänga av"(0,50). Riktvärdena för faktorerna uppfyller de krav som ställs för att betraktas som konsistenta. Motsvarande tester har skett av (Stragier, Hauttekeete, De Marez, 2012) när the EEB-scale utvecklades förutom för faktorn "priskänslig" (0,74) vilket vi utvecklat för vår studie.

⁴ Statistisk metod för att bilda faktorer av variabler som ingår i exempelvis en enkätundersökning.

⁵ ANOVA, Analysis of Variance.



Jämförelsen mellan boende i passivhuset Blå Jungfrun och boende i konventionella lägenheter som är byggda 2005 eller senare, visar att det finns signifikanta skillnader beträffande faktorerna "priskänslig", "uppgadera" och "stänga av", se bilaga 3, tabell 3.

2.3 DP 3: Analyser av förbrukning av elektricitet och olika beteendegrupper

Målsättningen med delprojekt 3 är att undersöka förbrukningen av kompletteringsvärme och varmvatten över tiden. För att testa vilka metoder som kan användas för det här ändamålet har vi analyserat långtidsserier av data från Blå Jungfrun. Förbrukningen av kall- och varmvatten, hushållsel samt kompletteringsvärme registrerats varje timme mellan 2010-2015. Vi har under genomförandet stött på stora svårigheter och drabbats av förseningar för att få datamaterialet behandlat och förberett. Dessvärre finns också många lägenheter med långa avbrott i registreringen av data, troligen genom att sensorer har upphört att fungera under vissa tidsperioder för att sedan bli aktiva igen. När problemen var avhjälpna har vi med hjälp av funktionell dataanalys och Fourier serier kunnat undersöka hur olika våningsplan, mikrolägen som orientering mot söder och om lägenheten är en hörnlägenhet påverkar förbrukningen av kompletteringsvärme och varmvatten över tiden. De förlopp som vi studerar är cykliska funktioner som cosinus/sinus variationer där utomhustemperaturen är ett exempel på ett sådant cykliskt förlopp som påverkar förbrukningen av elektricitet under olika årstider. Eftersom energiförbrukningen har stabila cykliska förlopp har vi modellerat förbrukningen som en funktion av tiden och utomhustemperaturen, givet olika egenskaper hos byggnaden. Den beroende variabeln i den regression som vi definierat är förbrukningen av kompletteringsvärme och varmvatten. Se bilaga 7, figur 5 för förklaring av hur genomförandet har skett av regressionen och figur 6 för Fourier serien. För att studera förbrukningsmönster för användandet av varmvatten och kompletteringsvärme har vi använt klusteranalys (Hennig, et.al, 2015), Klusteranalysen är utförd med R package fda.usc (Febrero-Bande & Oviedo de la Fuente, 2012). Klusteranalysen ger oss möjligheter att upptäcka latent klasser som är okända för oss och osynliga när vi betraktar datamaterialet. Vi använder den så kallade K-means algoritmen för att upptäcka ett antal kluster i förbrukningen av elektricitet av kompletteringsvärme där varje kluster representerar ett antal hushåll med ett specifikt beteende.



parafra; hushållen lever inte som de lär. Om den faktiska förbrukningen av elektricitet stämde överens med vad hushållen säger att de gör då ska vi erhålla statistiskt signifikanta relationer mellan faktorerna monitoring, upgradering och cutting med rätt negativt tecken på beta koefficienten mot förbrukningen av elektricitet (Y). Sammanfattar vi detta visar studien att hushållen är konsistenta i sin uppfattning om sig själva som priskänsliga, följa sin elförbrukning och uppgradera till lågenergiprodukter, men det leder inte till att de har lägre energiförbrukning jämfört med dem som säger att de inte bryr sig om priset på elektricitet och sin energiförbrukning.

3.1 DP 2: Skillnader mellan boende i passivhus och konventionella lägenheter

Resultat från jämförelsen mellan boende i passivhus och konventionella flerbostadshus visar att det finns signifikanta skillnader beträffande att vara priskänslig, stänga av el och genom att uppgradera till lågenergiprodukter när vi korrelerar attityden med energiförbrukningen per kvm BOA, se tabellen i bilaga 3. Resultatet från den statistiska jämförelsen med medelvärden visar att hushållen i passivhusen uppvisar signifikant högre medelvärden för dessa faktorer. Det betyder att hushållen i Blå Jungfrun upplever sig ha ett högre energi-effektivt beteende jämfört med hushållen i de konventionella flerbostadshusen. Finns det en signifikant skillnad i förbrukningen av hushållselektricitet mellan boende i Blå Jungfrun och konventionella flerbostadshus, när det finns signifikanta skillnader mellan grupperna beträffande det självskattade energi-effektiva beteendet? ANOVA analys, visar att det inte finns signifikanta skillnader mellan gruppernas elförbrukning (F-värdet ska vara mindre än 0,05 för att en faktor ska ha signifikant effekt på förbrukningen av elektricitet), se bilaga 3, tabell 3. Det här resultatet överensstämmer väl med resultaten i bilaga 2, tabell 2, DSEM analysen och Svenska Bostäders egna slutsatser.

3.3 DP 3: Analyser av förbrukning av elektricitet och olika beteendegrupper

Långtidsuppföljningen av energianvändningen i 97 lägenheter i passivhusen Blå Jungfrun visar på mycket stora variationer i förbrukning av elektricitet för kompletteringsvärme och varmvatten. I datamaterialet återfinns lika många potentiella förbrukningsmönster som hushåll, se bilaga 5, figur 3 och bilaga 6, figur 4. Genom klusteranalysen bildas 4 förbrukningskluster som förklarar 94,7 % av variationen i datamaterialet, se bilaga 7, figur 7 och figur 8. Kluster 2 har lägst förbrukning och kluster 3 innehåller hushåll som är mest troliga att använda mest kompletteringsvärme. Medel förbrukningen av kompletteringsvärme för respektive kluster är 29,49 (7,76), 5,81 (5,23), 98,55 (14,81) och 66,24



(8,12) kWh där värdet inom parantes är standardavvikelsen. Vi kan inte se ett systematiskt mönster som indikerar att storleken på lägenheten, våningsplan eller orientering har någon systematisk påverkan på användandet av kompletteringsvärme. Vilket vi inte direkt kan förvänta oss heller eftersom kompletteringsvärmen är oberoende av hur många som bor i lägenheten.

Den variabel som signifikant påverkar förbrukningen av elektricitet för varmvatten och kompletteringsvärme är utomhustemperaturen. För att åskådliggöra hur variationer ser ut mellan olika hushåll och deras förbrukning av kompletteringsvärme och varmvattenförbrukning finns information i bilaga 8, figur 8 och figur 9. De tredimensionella bilderna visar hur förbrukningen av varmvatten och kompletteringsvärme varierar beroende på variationer i utomhustemperaturen över årets olika dagar.



4 Diskussion

Resultaten från vår studie kastar delvis nytt ljus över hushållens elkonsumtion. Vi kan påvisa att hushållens inkomster har statistisk belagd effekt på förbrukningen av elektricitet. Ju högre inkomst desto högre förbrukning av elektricitet, se bilaga 2. Detta är kanske inte så överraskande. Men, vi kan påvisa att det finns en signifikant effekt av inkomsten för hur priskänslig hushållet är. Så ju högre inkomst desto mindre priskänslig är hushållet. Det är inte heller så förvånande men stämmer väl överens med gängse uppfattning hur effekten borde vara mellan inkomster och priset på el. Vi har också visat att det finns fyra olika förbrukningsprofiler för kompletteringsvärme i Blå Jungfrun. Vi har idag begränsade kunskaper i hur dessa förbrukningsprofiler uppstår och vad som påverkar deras förbrukning utan här behövs mera forskning. Vi har också påvisat hur förbrukningen av kompletteringsvärme kan återges via tredimensionella modeller där utomhustemperaturen påverkar brukarbeteendet.

4.1 Det räcker inte med information för att bryta invanda mönster

Det som förvånar oss och bidrar till att öka vårt vetande är att hushållen är konsistenta i sin uppfattning om sitt energi-effektiva beteende fram till att vi mäter deras faktiska förbrukning av elektricitet. Här upphör hushållen att vara konsistenta med sin uppfattning av hur inkomsten påverkar deras förbrukning av elektricitet, hur priskänsliga hushållet är och hur ofta hushållet läser och övervakar sin förbrukning av elektricitet samt om de uppgraderar till lågenergi produkter när gamla apparater ska bytas ut. Det vill säga, det kausala samband som vi har modellerat enligt Thaler & Shefrins teori om ekonomisk självkontroll bryts när effekten av beteendet når den faktiska förbrukningen av elektricitet. Från bilaga 3 och 4 får vi liknande resultat, men med andra statistiska metoder. Faktoranalysen och jämförelsen mellan Blå Jungfrun och konventionella lägenheter visar på signifikanta skillnader i hur hushållen uppfattar sitt energi-effektiva beteende. Vi förväntar oss att det ska finnas en signifikant påverkan på förbrukningen av elektricitet givet hushållens självskattade beteende. Det finns dock ingen skillnad i deras förbrukning av hushålls elektricitet som vi hade befarat med tanke på hushållens svar i enkäten. Hushållen har all anledning att hålla en lägre förbrukning av elektricitet mot bakgrund av deras svar, men gör det inte. Det finns ingen statistisk överensstämmelse mellan vad de säger sig göra och vad de faktiskt gör. Slutsatsen är att lämna information räcker inte



för att förändra invanda mönster och långtidsstudien i Blå Jungfrun, se bilaga 5 visar tydligt att det inte finns ett förbrukningsmönster utan lika många som det finns hushåll.

Hur ska vi kunna påverka incitamenten att spara energi för hushåll som bevisligen är priskänsliga och benägna att läsa räkningar samt intresserade att uppgradera till lågenergi produkter? Hur kan vi få hushållen att faktiskt sänka sin elkonsumtion så att den överensstämmer med vad hushållen säger sig göra. Gilbert & Graff Zinvin (2014) har visat att förbrukningen av elektricitet faller med 0,6-1,0 % första veckan efter att information om kostnaden erhållits via en räkning för att sedan återgå till tidigare nivåer.

För att göra något åt detta föreslår vi att vi återigen riktar vår uppmärksamhet till Thalers & Shefrins teori om ekonomisk självkontroll. Teorin utgår från att planeraren (planner) kan utöva inflytande på den del av personen som står för förbrukandet av resurser (doern). Planeraren, i ett el-perspektiv står för att läsa räkningar och följa energiförbrukningen över tiden har uppenbart ett för svagt inflytande på den faktiska förbrukningen av elektricitet. Om som i vårt fall, planeraren hade haft ett större inflytande på förbrukningen av kWh hade vi nog haft en samstämmighet mellan hushållens uppfattning om sig själva som energi-effektiva och den faktiska förbrukningen av elektricitet. Men hur skall detta gå till?

4.2 Beteende ekonomi visar vägar framåt för att reducera elförbrukning

Thaler & Shefrin ger ett exempel från ett bantningsprogram där personen kan räkna hur många kalorier som intagits och upphöra att tillföra kroppen mer energi vid en viss nivå. På samma sätt kan vi öka planerarens inflytande genom att ändra debiteringssystemet så att betalningen för elektricitet sker i förväg. Incitamenten för doern ökar att spara elektricitet genom att följa förbrukningen av inbetalda pengar över tiden. Det är känt att människor har en benägenhet att undvika förluster och värderar en förlust av 100 kr högre än en framtida vinst på 100 kronor (Kahneman, 2003; Kahneman, Knetsch, Thaler, 1991). På samma sätt fungerar troligen förbetald elektricitet genom att följa hur många kWh som förbrukas under en tidsperiod kan förbrukningen reduceras genom att planeraren utövar ett inflytande på doern vars konsumtion påverkas. Jämför med förbetald surf i en mobiltelefon där förbrukningen av internettrafik kan följas i real tid och när surfen allt mer förbrukas uppstår ett sparbeteende. Internationella studier visar att förbrukningen minskar med 10-15 % vid förskotts



betalning av elektricitet jämfört med att debitera för kostnader i efterskott. Att betänka är att reducera förbrukningen är lika med att tillföra 10-15 % elektricitet in i systemet för användning till andra ändamål exempelvis för att ladda eldrivna bils batterier. Vi kan också införa ett system för att öka incitamentet att spara elektricitet med en spel strategi, där inbetalda men inte förbrukade pengar sätts in på ett konto för framtida semesterresor eller i ett sparkonto för barnbarnen.

Hushållen i bostadssektorn förbrukar cirka 20 % av landets totala elförbrukning för bland annat matlagning, tvätt, belysning och hemelektronik vilket motsvarar 80 TWh (Lindén, 2008). 10-15 % inbesparing av hushållsel för 30 % av hushållen som är villiga att använda förbetald elektricitet motsvarar cirka 2,4-3,6 TWh elektricitet. Vilket motsvarar cirka 2,5 % av den totala elproduktionen.

4.3 DP 2: Skillnader mellan boende i passivhus och konventionella lägenheter

Det är intressant att konstatera att hushållen i passivhusprojektet Blå Jungfrun upplever sig vara mera energi-effektiv än hushåll boende i konventionella lägenheter, men sedan finns det inte signifikant skillnad mellan deras förbrukning av hushålls elektricitet. Resultatet från delprojekt 1 visar också att hushåll som bor i konventionella lägenheter och som ser sig som energi-effektiva inte lever som de lär. Vad betyder då detta? Resultaten pekar på hur otroligt svårt det är att förändra hushållens förbrukning av elektricitet genom exempelvis information. Något annat måste till helt enkelt. Vi har i delprojekt använt oss av beteendekonomisk teori för att visa på hur sparbetenden uppstår vilket mycket väl kan tillämpas inom elsektorn. Vill vi på allvar uppnå förändringar så behöver också debiteringssystemet förändras i grunden.

4.4 Analyser av förbrukning av elektricitet och olika beteendegrupper

Analyser av förbrukning av kompletteringsvärme och varmvattenförbrukning i Blå Jungfrun ger vid handen att det finns lika många förbrukningsmönster som det finns hushåll. Klusteranalysen som utförts tillsammans med regression och Fourieranalys visar hur det är möjligt att tolka förbrukningsmönster som inte är synliga för ögat. Det öppnar upp för både spännande och avancerade analyser av förbrukningsmönster som vi inte tidigare har använt oss av för att förstå vad som påverkar hushållens beteende. Som våra resultat visar så finns ingen förklaring att söka bland traditionella variabler som våningsplan, hörnbelägenhet och orienteringen av lägenheten när det gäller beteende utan här behövs ansatser som vi har visat fungera när det gäller att urskilja individuella förbrukningsmönster. Vi tror att interventioner för att påverka hushållens beteende först behöver



grundas i den här typen av metodik därför att den ger kunskap om vilka förbrukningsprofiler som finns i en grupp av hushåll. Hur många olika förbrukningsprofiler finns det i Sverige? Exempelvis bland småbarnsfamiljer eller äldre vuxna boende i småhus eller flerbostadshus i Stockholm eller Göteborg. Det är troligt att dessa behöver bemötas med argument utifrån den profil som hushållet har för att en intervention ska leda till reducerad energiförbrukning.



Rekommendationer

Mot bakgrund av våra teoretiska och statistiska resultat tycker vi att betydelsen av förbetald elektricitet är så intressant och att besparingspotentialen är tillräckligt hög för att en förstudie ska genomföras för att undersöka ekonomiska, tekniska och juridiska aspekter samt konsekvenser av ett sådant system. Vi rekommenderar också en studie för att öka vår förståelse för hur olika kluster och förbrukningsprofiler av elektricitet uppstår.

- Finansiera en förstudie av hur hushållen och elnätsföretag ser på förbetald elektricitet för att bedöma storleken på efterfrågan och utbud. Inkludera juridiska, tekniska samt ekonomiska aspekter på förbetald elektricitet.
- Finansiera en studie för att med hjälp av klusteranalys undersöka varför det uppstår olika förbrukningsprofiler och hur man bör kommunicera med dessa i olika delar av landet för att öka sannolikheten att lyckas med interventioner.



5 Publikationslista

Lundgren, B., & Shultzberg, M., (2018). Does energy-effectiveness matter for energy conservation?. Under review.

Lundgren, B., & Zalejska Jonsson, A. (2017). Samhällsbyggnadsdagarna, Långtidsuppföljning av energianvändning i lågenergihus, KTH.

Lundgren, B., (2018). Underlying determinants of energy use and energy savings, 24TH Annual Pacific Rim Real Estate Society Conference, The University of Auckland, NZ.

Lundgren, B., (2018). Forskningsseminarium 2018-03-08, Kungliga Tekniska Högskolan.

Samhällsbyggaren 2018. Tidningsartikel, Förändrat debiteringssystem för elektricitet bidrar till ett långsiktigt hållbart energisystem, Utgåva November 2018.

Tidningen Bo Bättre. Tidningsartikel, Förändrat debiteringssystem för elektricitet bidrar till ett långsiktigt hållbart energisystem, Utgåva November 2018.

Lundgren, B., (2018). Forskningsseminarium 2018-11-21, Centrum för byggeffektivitet, Kungliga Tekniska Högskolan.



Referenser

- Asparouhov, T., Hamaker, E. & Muthen, B. (2018) Dynamic structural equation Models, *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 25, 359-388.
- Ehrhardt-Martinez, K., Donnelly, K.A. & Laitner, S. (2010). Advanced metering initiatives and residential feedback programs: A meta-review for household electricity-saving opportunities, American Council for an Energy-Efficient Economy.
- Febrero-Bande, M. and Oviedo de la Fuente, M. (2012). Statistical computing in functional data analysis: The R package fda.usc. *Journal of Statistical Software*, 51(4):1-28.
- Gilbert, B. & Graff Zivin, J. (2014). Dynamic salience with intermittent billing: Evidence from smart electricity meters, *Journal of Economic Behavior & Organization*, 107, 176-190.
- Kahneman D. (2003). A psychological perspective on economics. *American Economic Review*; 93:162.
- Kahneman D. Knetsch, L., Thaler R.H., (1991). Anomalies: the endowment effect, loss aversion, and status quo bias. *Journal of Economic Perspective*, 5:193-206.
- Hennig, C., Meila, M., Murtagh, F., Rocci, R. (2015), Handbook of Cluster Analysis, CRC Press.
- Lindén, Carlsson-Kanyama, Eriksson, (2006). Efficient and inefficient aspects of residential energy. behaviour: What are the policy instruments for change? *Energy Policy* (34).
- Lindén, K., (2008) Hushållsel - effektivisering i vardagen, Research Report 2008:5, Department of Sociology, Lund University.
- Pierce, Schiano, Paulos, (2010). Home habits and energy: Examining Domestic interactions and energy consumption. Paper presented at the 28th conference on human factors.
- RAND Europe (2012). What works in changing energy-using behaviours in the home? A rapid evidence assessment. Final report, November (<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130103044334/http://www.decc.gov.uk> climate-change/saving-energy-co2/6921-what-works-in-changing-energy-using-behaviours-in-.pdf. (Accessed January 2018).
- Katzeff, C., Hasselqvist, H., Örnevall, E., Nyström, S., (2017). Smarta Elnät – För Vem? E2B2, Energimyndigheten.



Ramsay, J. and Silverman, B. W. (2005). *Functional data analysis*. Springer-Verlag, New York.

Stragier, J., Hauttekeete, L., De Marez. (2012), Measuring Energy-Efficient Behavior in Households: The Development of a Standardized Scale, *ECOPSYCHOLOGY*, Vol. 4 (1).

Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 58:267–288.

Thaler, R.H & Shefrin, H.M. (1981). An Economic Theory of Self-Control, *Journal of Political Economy*, 89 (2).

Önnevall, E., et.al., (2017). Framtidsgränd – Utveckling av hållbara livsstilar i renoverade bostäder för smarta elnät, E2B2, Energimyndigheten.



Bilagor

Bilaga 1. Enkätfrågor

- V1 Priset på el påverkar er energianvändning?
- V2 El-priset är för lågt för att ha någon praktisk betydelse för er energianvändning?
- V3 El-priset får dig att tänka på er energiförbrukning?

- V4 Läser ni era elräkningar regelbundet?
- V5 Följer ni energiförbrukningen i er lägenhet?
- V6 Håller ni koll på hur mycket el som ni gör av med varje månad?

- V7 Stänger ni av er TV helt och hållet när den inte används?
- V8 Stänger ni av datorn helt och hållet när den inte används?
- V9 Lämnar ni lampor tända när rummet lämnas?

- V10 Kontrollerar ni energiförbrukningen när ni köper nya el-artiklar?
- V11 Byter ni ut era gamla lampor till nya lågenergilampor?
- V12 När ni köper nya el-artiklar väljer ni dem med lägst energiförbrukning?

Tabell 1. The Energy-Efficient Scale(Stragier, Hauttekeete, De Marez, 2012) kompletterat med dimension priskänslighet för att mäta graden av energi-effektivt beteende hos hushållen.



Parameter	Estimat	Posterior sd	p	Lower	Upper	Signifika	
Within							
Bilaga 2 ⁶	KWH ON SPRING	-0.173	0.008	0.000	-0.189	-0.157	SANN
	KWH ON FALL	-0.079	0.008	0.000	-0.095	-0.063	SANN
Between							
	PRICE ON INCOME	-0.126	0.055	0.005	-0.250	-0.031	SANN
	PRICE ON AGE	0.113	0.067	0.028	-0.003	0.260	FALSK
	MONIT ON INCOME	0.074	0.056	0.076	-0.029	0.191	FALSK
	MONIT ON PRICE	0.323	0.160	0.007	0.070	0.698	SANN
	MONIT ON AGE	-0.037	0.071	0.298	-0.169	0.111	FALSK
	CUTTING ON MONIT	0.470	0.299	0.042	-0.060	1.123	FALSK
	UPGRA ON MONIT	0.638	0.324	0.000	0.228	1.496	SANN
	KWH ON INCOME	0.114	0.034	0.001	0.047	0.179	SANN
	KWH ON PRICE	0.063	0.086	0.206	-0.089	0.250	FALSK
	KWH ON MONIT	-0.035	0.086	0.330	-0.211	0.130	FALSK
	KWH ON UPGRA	0.086	0.070	0.043	-0.013	0.249	FALSK
	KWH ON CUTTING	-0.049	0.026	0.027	-0.099	0.001	FALSK
	KWH ON AGE	0.033	0.064	0.305	-0.094	0.157	FALSK
	LOGV ON INCOME	0.178	0.056	0.003	0.059	0.280	SANN
	LOGV ON PRICE	0.105	0.128	0.181	-0.127	0.379	FALSK
	LOGV ON MONIT	-0.155	0.129	0.093	-0.434	0.074	FALSK
	LOGV ON UPGRA	0.087	0.096	0.112	-0.059	0.307	FALSK
	LOGV ON CUTTING	-0.005	0.038	0.449	-0.080	0.071	FALSK
	LOGV ON AGE	-0.115	0.095	0.111	-0.303	0.070	FALSK
	PHISUM ON INCOME	-0.031	0.008	0.000	-0.046	-0.016	SANN
	PHISUM ON PRICE	-0.029	0.020	0.044	-0.076	0.005	FALSK
	PHISUM ON MONIT	0.018	0.019	0.153	-0.017	0.060	FALSK
	PHISUM ON UPGRA	-0.016	0.014	0.068	-0.050	0.006	FALSK

⁶ Tabell 2. Statistiska resultat från DSEM modellen över hushållens energi-effektivitet relativt deras förbrukning av hushållselektricitet.



Bilaga 3.

Faktorer bildade vid principalkomponent analys		Antal	Medelvärde	Std. Avvikelse	T-värde	Signifikans nivå
Övervaka	1 Blå Jungfrun	33	3,0606	1,11010		
	2 Ellevio	102	2,8105	1,20003	1,059	,290
Stänga av	1 Blå Jungfrun	33	4,1439	1,04775		
	2 Ellevio	102	3,4739	1,13203	3,008	,003
Uppgradera	1 Blå Jungfrun	33	3,9697	,88727		
	2 Ellevio	102	3,4085	,99050	2,889	,004
Priskänslig	1 Blå Jungfrun	33	3,4242	,82611		
	2 Ellevio	102	2,8039	,98208	3,271	,001

Tabell 3. T-test av skillnader mellan boende i Blå Jungfrun och konventionella lägenheter för faktorer "övervaka", "stänga av el", "uppgradera", "priskänslig". Dubbelsidigt konfidensintervall. SPSS 24.0.

Bilaga 4.

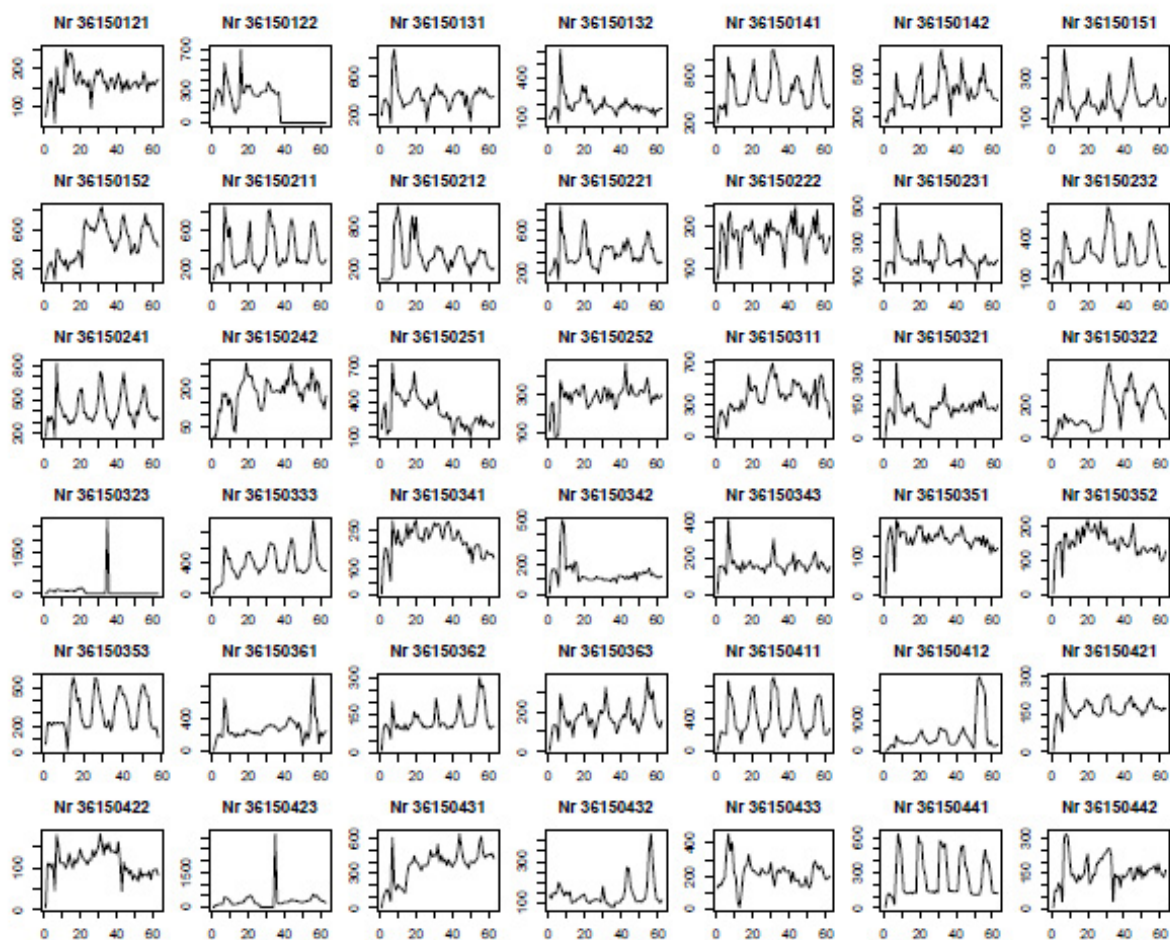
ANOVA test av effekter mellan faktorer				
Dependent Variable:	Förbrukning per kvm			
Source	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	116	118,722	0,545	0,938
Intercept	1	15639,744	71,856	0,000
Övervaka	12	121,992	0,560	0,830
Stänga av	25	111,166	0,511	0,916
Uppgradera	11	136,908	0,629	0,771
Priskänslighet	13	152,318	0,700	0,731
Blå Jungfrun vs Ellevio	1	78,969	0,363	0,560

a. R Squared = ,864 (Adjusted R Squared = -,720)

Tabell 4. Anova analys för skillnader i förbrukning av elektricitet per kvm BOA för faktorer "övervaka", "stänga av el", "uppgradera", "priskänslig". Dubbelsidigt konfidensintervall. SPSS 24.0.



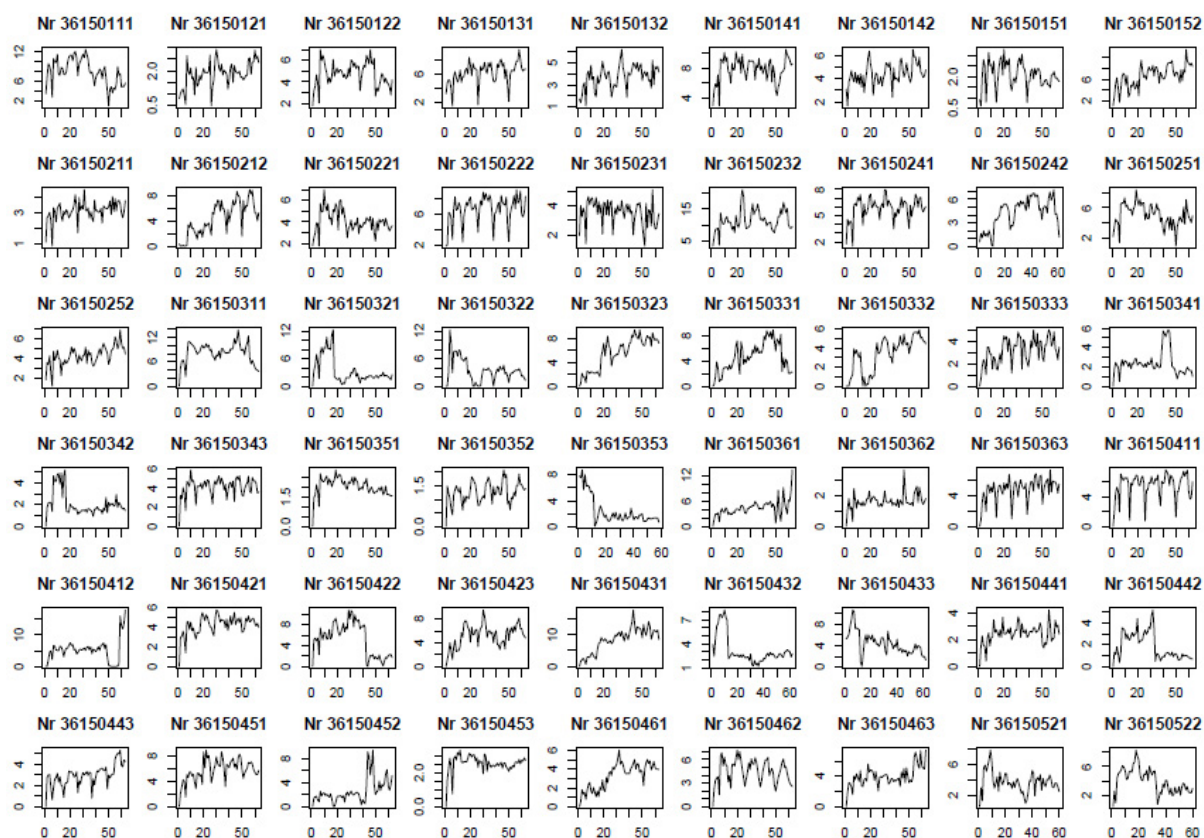
Bilaga 5



Figur 3. Värden för kompletteringsvärme för hushåll 53 boende i Blå Jungfrun. Tidsperiod 55 månader, Kwh förbrukning och lägenhetsnummer.



Bilaga 6



Figur 4. Värderna för varmvattenförbrukning för 53 hushåll boende i Blå Jungfrun. Tidsperiod 2010-11 till 2015-04, förbrukning m³ vatten och lägenhetsnummer.



Bilaga 7

$$y_i(t) = \beta_0 + \beta_1 BOA_i + \beta_2 Plan_i + \beta_3 I(\text{Gavellägenhet}) \\ + \beta_4 I(\text{Söderläget}) + \beta_5(t) \text{Temperature}(t) + e_i(t),$$

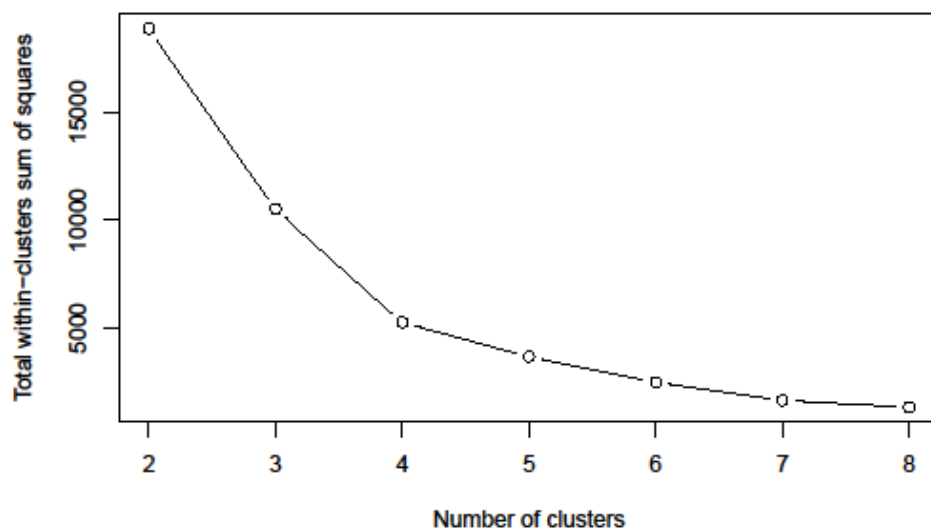
Figur 5. Regressionsmodellen.

$y_i(t)$ är förbrukningen av kompletteringsvärme för varje enskilt hushåll dividerat med lägenhetsstorleken. Samtliga β är regressionskoefficienter och $I()$ är indikator funktionen som beskriver om det är en gavellägenhet, våningsplan eller om lägenheten har ett söderläge. $e_i(t)$ är den så kallade feltermen. Temperaturen (t) är den genomsnittliga utomhustemperaturen under dagen.

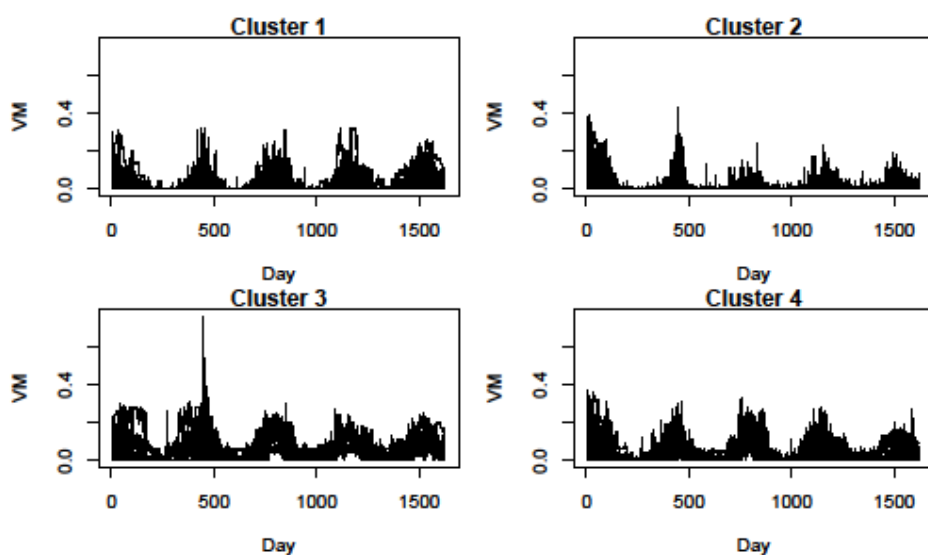
$$\beta(t) = c_0 + \sum_{j=1}^{2k} \left[c_{2j-1} \sin\left(\frac{2\pi j}{T}t\right) + c_{2j} \cos\left(\frac{2\pi j}{T}t\right) \right],$$

Figur 6. Fourier serie.

Vi använder Fourier serien för att expandera den okända temperatur funktionen, $\beta_5(t)$ i regressionsmodellen. Alla c -värden är okända koefficienter och T är tidsperioden. Antalet k i Fourier serien behöver bestämmas manuellt. Vi undviker att anpassa funktionen för mycket genom att korsvalidering av datat. Det sker genom att vi delar in 94 lägenheter i Blå Jungfrun i 5 grupper, där 4 grupper har 19 lägenheter vardera och 1 grupp har 18 lägenheter. 4 grupper används för att beräkna och anpassa modellen och kvarvarande lägenheter används för att prediktion. K väljs så att graden av anpassning av modellen till datat blir så litet som möjligt för att göra resultatet så generaliseringsbart som möjligt. Antalet basfunktioner i modellen är 35 vilket ger en minimum tidsperiod av 3 veckor. Därefter används data som omfattar 1626 dagar för prediktion.



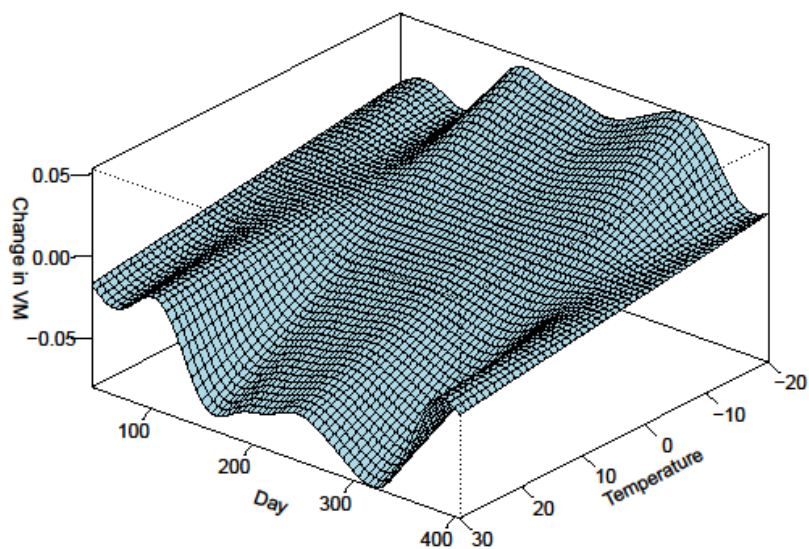
Figur 7. K-means kluster för 94 hushåll givet deras förbrukning av kompletterings-värme i Blå Jungfrun. Grafen är ett underlag för att välja ett antal kluster för vidare analys.



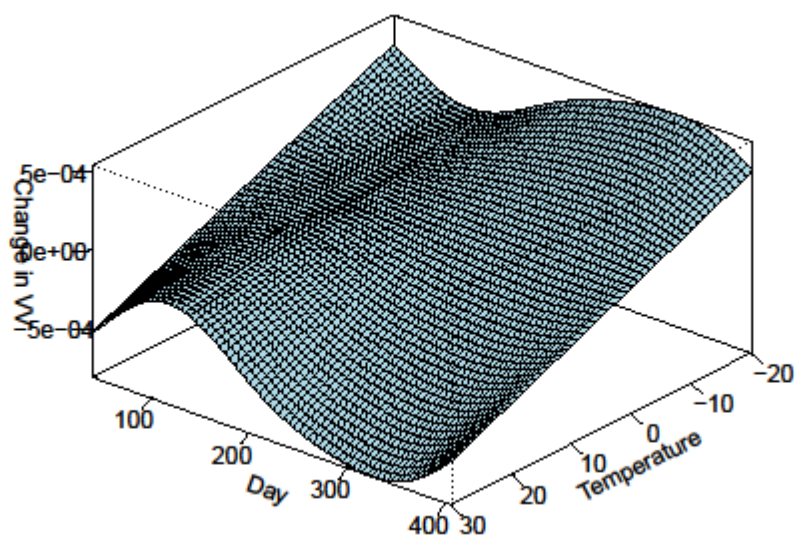
Figur 8. Fyra K-means kluster som bildats i figur 7. Kluster 1 har 19 lägenheter, kluster 2 har 52 lägenheter, kluster 3 har 10 lägenheter och kluster 4 har 13 lägenheter.



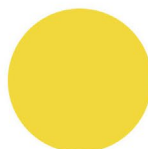
Bilaga 8.




Figur 9. Tre dimensioner där förbrukningen av kompletteringsvärme återges givet utetemperatur, och tidpunkt under året i dagar från årsskiftet. 94 hushåll boende i Blå Jungfrun.



Figur 10. Tre dimensioner där förbrukningen av varmvatten återges givet utetemperatur, och tidpunkt under året i dagar från årsskiftet. 30 hushåll boende i Blå Jungfrun.



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

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