LÅGTEMPERATUR-UPPVÄRMNING MED TILLUFTSRADIATORER OCH VÄRMEÅTERVINNING I FRÅNLUFT

En varsam renovering av flerbostadshus för energieffektivisering

LÅGAN Rapport december 2013

Jonn Are Myhren
Thomas Olofsson
Martin Bergdahl

LÅGAN - FÖR ENERGIEFFEKTIVA BYGGNADER

LÅGAN - PROGRAM FÖR BYGGNADER MED MYCKET LÅG ENERGIANVÄNDNING - WWW.LAGAN

LÅGAN - FÖR ENERGIEFFEKTIVA BYGGNADER

HÖGSKOLAN DALARNA

FÖRSTUDIE

Lågtemperaturuppvärmning med tilluftsradiatorer och värmeåtervinning i frånluft

- **en varsam renovering av flerbostadshus för energieffektivisering**

Energi och miljökompetenscentrum (EMC)

Jonn Are Myhren
Thomas Olofsson
Martin Bergdahl

December 2013

Högskolan Dalarna
Energi- och miljöteknik

En investering för framtiden
EUROPEISKA UNIONEN Europeiska regionala utvecklingsfonden
LÄNSSTYRELSEN DALARNAS LÄN
REGION DALARNA
Borlänge Energi
Falu Energi & Vatten

Förord

Vi står inför en stor omställning i byggbranschen. För att nå framtida energimål krävs kostnadseffektiva renoveringsinsatser med systemperspektiv med syfte att sänka energianvändningen i det befintliga byggbeståndet. Avsikten med denna förstudie har varit att identifiera energieffektiva renoveringspaket för ”varsam renovering” av rekordårens flerbostadshus såväl som bostadshus och småhus. Förstudien har genomförts med stöd från Lågan (laganbygg.se). LÅGANs ändamål är att:

- stimulera till energieffektiv ny- och ombyggnad,
- synliggöra en nationell marknad för byggnader med låg energianvändning,
- bidra till ett brett nationellt utbud av leverantörer av produkter och tjänster och trygga beställare av sådana

Pilsundet Fastigheter Borlänge har ställt upp med två mindre flerbostadshus till fallstudier.

ÅF Falun har bidragit med datainsamling, lufttryckprovning och livscykelanalys (LCC-analys).

Studien har genomförts av tekn dr Jonn Are Myhren med handledning från professorerna Thomas Olofsson och Martin Bergdahl vid Högskolan i Dalarna. Ett antal examensarbeten har givit input till rapporten.

Energigruppen inom branschnätverket ByggDialog Dalarna har agerat som referensgrupp. Gruppen på ungefär 20 personer borgar för relevans av valda studieobjekt och genomförda kostnadsjämförelser.

Förslag till vidare forskning;

- Implementeringsstudie, demoprojekt, där energiprestanda och konsekvens för inomhusklimat med föreslagna renoveringspaket i denna förstudie mäts, för- och nackdelar undersöks och information sprids på liknande sätt som i projektet Brogården i Alingsås kommun
- Djupare och bredare analys av brukarvänlighet och bevarandekrav med föreslagna renoveringspaket i denna förstudie. Tillämpning även på småhus byggda före 70-talet
- Utvärdering av systemeffektivisering med möjligheten för lågtemperaturbyggnader kopplade till returledning i fjärrvärmenät

Sammanfattning

För att nå reella sänkningar av energianvändningen i hela byggnadsbeståndet krävs tillgång till kostnadseffektiva renoveringspaket med energieffektiva systemlösningar där samspel mellan installationssystem och byggnad beaktas.

Denna förstudie belyser möjligheter med alternativa renoveringspaket med lågtemperatur-tilluftsradiatorer och värmeåtervinning i frånluften (FX). Systemkombinationer och jämförelser har gjorts med mera etablerade lösningar med traditionella radiatorer, balanserad mekanisk ventilation (FTX) och solvärme. Mindre prövade lösningar såsom frånluftsmoduler (VBX) kopplat till befintliga värmepumpar och behovsstyrd ventilation undersöktes också.

Energianvändning och kostnadseffektivitet med de undersökta åtgärdspaketen prövades för två äldre bostadshus med vardera specifika restriktioner: den ena inom fjärrvärmenätet och det andra ett K-märkt hus utanför fjärrvärmenätet. Samtidigt reflekterades det över vilka tekniska lösningar som samtidigt är gynnsammast ur hållbarhetssynpunkt. För flertalet befintliga byggnader behöver såväl metoder som komponenter utvecklas på ett varsamt sätt som uppfyller båda ägarens krav som övergripande mål baserat på systemförutsättning och kostnadseffektivitet.

Förstudien visar att:

- lågtemperatur-tilluftsradiatorer är en systemkomponent som möjliggör ökad komfort via förvärmning och filtrering av inkommande ventilationsluft, effektivare värmeproduktion och minskning av värmeförluster i distribution av varmvatten. Renovering med installation av FX-system i kombination med lågtemperatur-tilluftradiatorer är ett alternativ till FTX system som begränsar byggåtgärderna i byggnaden och ger lägre livscykelkostnad

- Byggnadsskalets täthet blir avgörande för energinyttan båda med FX- och FTX-system. Förstudien visar att FX-system är fördelaktig i byggnader med dålig lufttäthet

- I byggnader med befintligt frånluftssystem kan behovsstyrning av ventilationen vara ett enkelt och kostnadseffektivt sätt att sänka ventilationsförlusterna och spara energi som alternativ till att installera återvinningssystem

Förstudien visar klart att energieffektiv renovering kan åstadkommas med val av varsamma metoder som också åstadkommer ökad komfort och systemnytta, utanför såväl som inom fjärrvärmenätet. Samtidigt kan ägarens krav på kostandsnytta nås och byggnaders bevarandekrav uppfyllas.
Nu krävs det demonstrationsprojekt för att inte minst sprida kunskap i branschen men också applicering på större bostadsområden.

Innehåll

1 Inledning……4

1.1 Bakgrund……4

1.1.1 Vanliga ventilationssystem……4

1.1.2 Lågtemperatur-tilluftsradiatorer och FX-ventilation – ett slumrande alternativ……7

1.2 Syfte……7

1.3 Metod……8

1.4 Avgränsningar……8

2 Utgångspunkter för renovering av värme- och ventilationssystem i äldre flerbostadshus……10

2.1 Energihushållning……10

2.2 System som ingår i renoveringsförslagen i denna förstudie ……12

2.2.1 Balanserad ventilation med värmeåtervinning (FTX-system)……12

2.2.2 Tilluftsradiatorer……12

2.2.3 Frånluftsvärmepump (FX-system)……13

2.2.4 Markvärmepump……15

2.2.5 VBX-modul……15

2.2.6 Fjärrvärme……15

2.2.7 Solvärme……15

2.2.8 Behovsstyrd ventilation……16

2.3 Betydelsen av ofrivillig ventilation vid renovering……16

2.3.1 Oavsett ventilationssystem så har vi luftläckage……16

2.3.2 För att begränsa ofrivillig ventilation har vi normer……18

2.3.3 Lufttätheten i befintliga och nya byggnader……18

2.3.4 Energin som krävs för att värma luftläckaget……19

2.3.5 Infiltrationens påverkan på tilluftsradiatorer……21

3 Fallstudier……22

3.1 Bergsätravägen……22

3.1.1 Indata för beräkning i TMF Energi samt LCC-analys……24

3.1.2 Resultat……24

3.1.3 Kostnadsanalys……28

3.1.4 Diskussion……29

3.2 Hovgården……32

3.2.1 Indata för beräkning i TMF Energi samt LCC-analys……33

3.2.2 Resultat……34

3.2.3 Kostnadsanalys……38

3.2.4 Diskussion……39

4 Slutsatser……43

Referenser

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Av Sveriges ca 2,4 miljoner lägenheter i flerbostadshus är en betydande andel byggda mellan 1965 och 1975 under det så kallade Miljonprogrammet. De flesta av dessa har idag ett behov av genomgripande renovering. En stor andel av husen använder fjärrvärme för uppvärmning och har varierande storlek, utformning, byggmaterial och byggnadsteknik. Luftväxlingen styrs antingen med självdrag (S) eller med frånluftsventilation (F) utan värmeåtervinning.

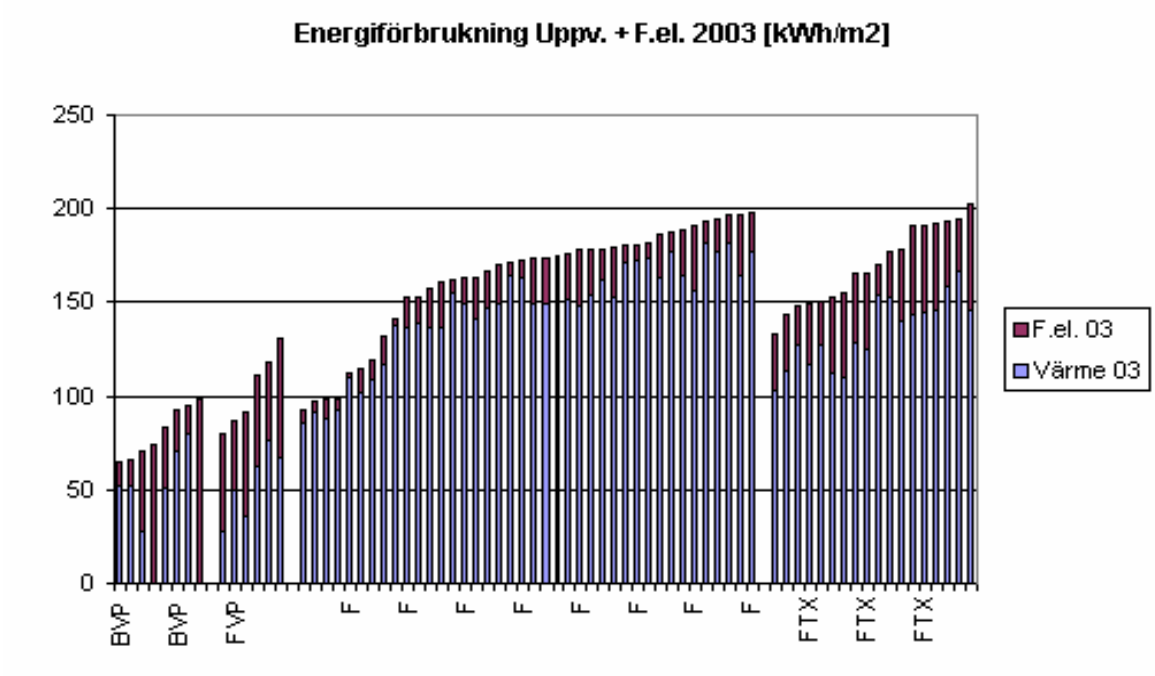
Renovering behöver göras då komponenter i äldre byggnader har nått slutet av sin livslängd och är i så pass dåligt skick att de inte uppfyller sin funktion, t ex installationer, träfönster, fasader och tegeltak. När åtgärder ska göras bör fastighetsägarna samtidig passa på att energieffektivisera. Boverket ställer redan krav på energiprestanda för ombyggnationer, troligtvis kommer också tydligare krav för renoveringar [1]. Allt för att hela byggnadsbeståndet skall närma sig kravnivåer för nollenergibyggnader (NNE-krav).

Renoveringsåtgärder med syftet att spara energi kan omfatta allt från tilläggsisolering och byte till byggnadsdelar med lägre U-värde i byggnadsskalet till byte eller installation av energieffektiva apparater. En nödvändig och prioriterad fråga vid renovering är återvinning av energi i ventilationssystem.

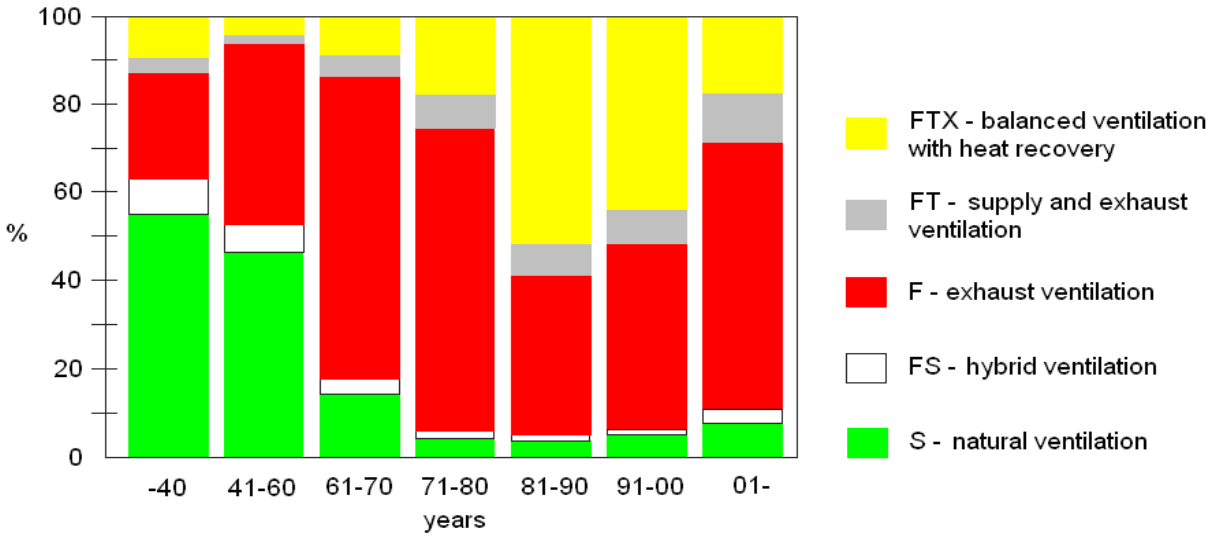
1.1.1 Vanliga ventilationssystem

Från energikrisen på sjuttiotalet till mitten på nittiotalet var det populärt att installera balanserade ventilationssystem med värmeåtervinning, så kallade FTX-system. Men sämre energieffektivitet än förväntat och en allmän uppfattning att luftkvalitén inomhus blev sämre gjorde att man övergav denna lösning till fördel för enklare system [2]. Den slutsatsen illustreras också i studien i Figur 1 som redovisar energianvändningen för ett antal befintliga flerbostadshus [3]. Figur 2 visar relationen mellan olika typer av ventilationssystem som har installerats i Svenska bostäder under det senaste decenniet [4].

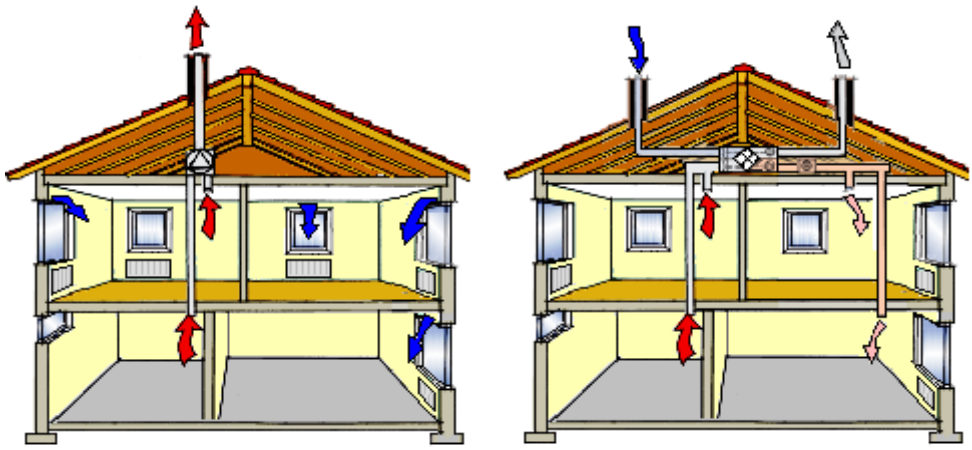
I Figur 3 visas principen för F-, FTX- och FX-ventilation. Uppe till vänster: F (frånluftsventilation): en fläkt suger ut förorenad luft från badrum och kök. Undertrycket som skapas drar in ny luft genom fönsterventiler. Uppe till höger: FTX (balanserad ventilation med värmeåtervinning): denna lösning har frånluftskanaler precis som F-ventilation, men på vinden sitter också en värmeväxlare där energi överförs från utgående luft till tilluften som leds in genom tilluftskanaler till don i sovrum och vardagsrum. Nere till vänster: FX (frånluftsventilation med värmeåtervinning): i detta system förs frånluften till en värmepump som tar tillvara på energi och använder denna för effektivare uppvärmning. Tilluften tas in genom tilluftsradiatorer. Nere till höger: Principen för en tilluftsradiator (också kallad ventilationsradiator). Kall utomhusluft sugs in genom ett galler och en kanal i husväggen på grund av skillnader mellan utomhus- och inomhustryck. Ett filter bakom radiatorn renar den inkommande luften. Luften stiger mellan radiatorpanelen medan den värms upp och kommer in i rummet uppvärmd till rumstemperatur.



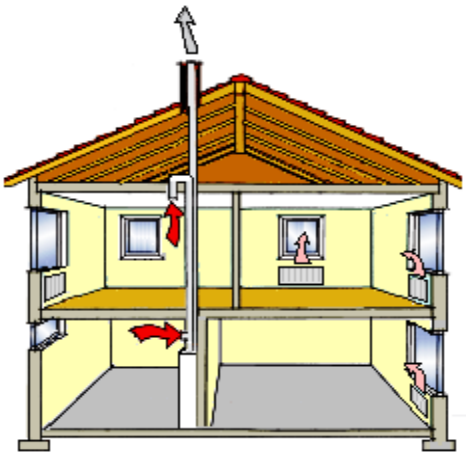
Figur 1. Energianvändning och fastighetsel år 2003 i flerbostadshus byggda mellan 1993 och 2002. BVP = Bergvärmepump, F=Frånluftsystem och FTX= Från och tilluft med värmeåtervinning.

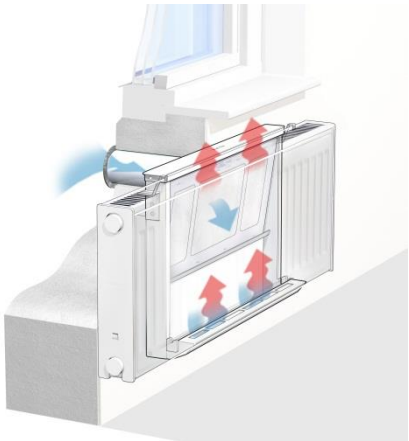


Figur 2. Ventilationssystem installerade i Svenska bostäder under det senaste decenniet (på engelska). F=Frånluftsystem, FT= Från och tilluftssystem, S=Självdragsystem och FTX= Från och tilluft med värmeåtervinning.



F FTX





FX Tilluftsradiator (källa: Acticon.se)

Figur 3. Principer för vanligt förekommande ventilationssystem samt tilluftsradiator.

Under de senaste åren, som en följd av nya byggregler, ser vi åter en trend i att installera FTX-system. Ännu en gång är motiveringen att sänka energiförbrukningen.

Nya typer av FTX-aggregat har bättre verkningsgrad än gamla. Men trots detta finns få studier som visar att energieffektiviteten blir bättre om man byter från befintlig F- eller S-ventilation till FTX-system. I Gävleborgs län gjordes det till exempel undersökningar på elva flerbostadshus där olika åtgärdspaket jämfördes [5]. Här visade det sig att åtgärdspaketen där FTX ingår inte blir mer energieffektiva eller speciellt lönsamma för några av objekten.

En färsk rapport från CIT Energy Management (EFFSYS) visar däremot att installation av frånluftsvärmepump (FX-system) är den renoveringsåtgärd som ger lägst livscykelkostnad i förhållande till energibesparingen för de flesta byggnadstyper [6]. Precis som med FTX-system återvinner man energi i frånluften med en frånluftsvärmepump. Skillnaden är att energin återförs till inkommande ventilationsluft i FTX-systemet, medan energin i FX-systemet oftast används för att värma vatten till rumsvärmare och tappvatten.

1.1.2 Lågtemperatur med tilluftsradiatorer och FX-ventilation - ett slumrande alternativ

Forskning i STEM-projektet ”Lågtemperaturuppvärmning” visar att tilluftsradiatorer, rumsvärmare anpassade för frånluftsventilerade byggnader, kan ingå i systemlösningar med FX-system och värmepumpar och skapa bättre energieffektivitet än system med traditionella rumsvärmare och FTX-system [7]. Denna studie preciserar att hela byggnaden med både klimatskal som värmeproduktion, värme- och ventilationssystem måste bedömas som en helhet då samspelet mellan komponenterna är essentiellt. Totallösningen med tilluftsradiatorer, FX-system och värmepump ingick varken i studien från Gävleborgs län eller EFFSYS, inte heller i likande rapporter från SP och Lunds Universitet [8, 9].

Tilluftsradiatorer är effektivare än traditionella radiatorer vilket gör att de kan ge samma värmeeffekt till rummet vid lägre vattentemperaturer. Lågtemperatursystem med tilluftsradiatorer kan därmed bättre utnyttjas för att spara energi i både produktion och distribution av värme i ett system med värmepump (FX) än system med traditionella radiatorer [10]. Hållbara lågvärdiga energikällor såsom solenergi blir också mera tillgängliga med lågtemperatursystem [11].

”Trots fokus på området saknas fortfarande rationella totalrenoveringsmetoder”, hävdas det i rapporten ”Energieffektivisering av Sveriges flerbostadshus - Hinder och möjligheter att nå en halverad energianvändning till 2050” [12]. De nya rapporterna som nämns ovan hjälper oss en bit på vägen ([5, 6, 8, 9]).

Avsikten med denna rapport är att komplettera dessa med att utvärdera renoveringspaket med lågtemperatur-tilluftsradiatorer och FX-ventilation; lösningar där man precis som med FTX-system möjliggör återvinning av ventilationsluft samtidig som tilluften kommer in förvärmd. Rapporten fick undertiteln ” Varsam renovering av flerbostadshus” då dessa renoveringspaket troligtvis innebär mindre modifieringar av byggnaden och därmed också mindre störningar för de boende.

1.2 Syfte

Denna förstudie syftar till att jämföra och belysa vilken energibesparing som kan uppnås i flerbostadshus representativa både för beståndet i Dalarna och resten av landet om

> **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer** väljs som renovationsåtgärd som alternativ till
> **FTX-ventilation**

Då ett viktigt syfte har varit att identifiera lämpliga renoveringspaket har kombinationer med vissa andra renovationsåtgärder gjorts.

Hur åtgärderna påverkar flerbostadshus belägna inom eller utanför fjärrvärmenätet diskuteras. Om ytterligare besparing kan göras med behovsstyrd ventilation är medtaget i den ena redovisade fallstudien (Hovgården). Den viktigaste aspekten att beakta för att skapa ett väl fungerande ventilationssystem, nämligen byggnadsskalets täthet, behandlas mera i detalj.

1.3 Metod

Förutsättningarna för att utföra renoveringsåtgärderna **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer** och **FTX-ventilation** på flerbostadshus representativa för beståndet i Dalarna och resten av landet undersöktes som en litteraturstudie. Denna teori presenteras i kapitel 2.

I kapitel 3 presenteras två konkreta fallstudier där energianvändningen teoretiskt har beräknats med en modifierad version av programmet TMF Energi [13]. Programmet, som inte favoriserar någon systemlösning, är framtaget av SP (Sveriges Tekniska Forskningsinstitut) och baseras på SS-EN ISO 13790:2008. Programmet används normalt till att beräkna energianvändning i småhus baserat på byggnadsfysikaliska data, val av ventilations- och värmesystem och interna värmelaster. Samarbete mellan SP och vår forskningsgrupp på Högskolan Dalarna har lett till att lågtemperatursystem har införts i programmet och modifikationer har gjorts för att även kunna simulera flerbostadshus.

Brukarindata till energiberäkningen togs från Boverket [14], byggnadsfysikaliska data från respektive byggnad medan klimatdata togs från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI).
För varje byggnad har en jämförelse mellan systemlösningarna gjorts. Dessutom redovisas energianvändningens beroende av lufttäthet i byggnadsskalet, respektive isoleringsgrad. Objekten som har undersökt betecknas:

1) Bergsätravägen (Grycksbo i Dalarna)
2) Hovgården (Borlänge)

Temperaturnivån i radiatorkretsen beräknades med Purmo Simulator [15].

ÅF Falun anlitades för att inhämta byggnadsfysikaliska indata, medverka under tryckprovning samt göra kostnadsbedömning av renoveringsalternativen. Tryckprovningen för att bedöma lufttäthet i byggnadsskal gjordes enligt standarden ISO 9972/EN 13829 (*q50*). I kostnadsanalysen användes en så kallad Life Cycle Cost-beräkning, en analys där kostnader och besparad energi för varje åtgärdspaket sammanställdes över dess livslängd. Analysen gjordes för tänkta lägenheter på 70 m^2 i vardera objekt.

1.4 Avgränsningar

Utvecklingen av värme- och ventilationssystem har skjutit fart som en följd av tuffare energikrav i byggnader. I denna rapports teoridel diskuteras verkningsgrader på komponenter som typiskt ingår vid byte till **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer** eller **FTX-ventilation**. Dock har enbart en typ av varje komponent analyserats i kapitel 3. Indata för dessa kommer från tillverkare. I fallen med FTX-ventilation har husets befintliga värmesystem behållits.

Bevarandekrav sätter begränsningar för renoveringsåtgärder i många äldre flerbostadshus. I IVA:s senaste rapport om renovering av flerbostadshus står det ”riksantikvarieämbetet har utökat bevarandekraven på ett sätt som allvarligt kan begränsa möjligheterna att åtgärda stora delar av våra flerbostadshus, främst inom miljonprogramsområden ” [12].
Det ena flerbostadshuset i denna studie är K-märkt och som en konsekvens av kulturminnesskyddet kan bara begränsade insatser göras på klimatskalet. Renoveringspaket med FX-ventilation och

tilluftsradiatorer tros vara lämpliga i fall med skyddad fasad där åtgärder på klimatskalet annars skulle varit kostnadseffektiva. Någon utvärdering av detta påstående blev inte gjort, däremot anses det vara en viktig del av fortsatt arbete.

Någon utredning av primärenergiförbrukningen har inte gjorts inom denna förstudies ram. Detta är en viktig del av fortsatt arbete för systemoptimeringen. Denna fråga kommer att särskilt belysas i uppstartat doktorandarbetet vid Högskolan i Dalarna, se ”Förstudien har lett till” i kapitel 4.

I LCC analysen antogs en livslängd för alla installationer på 15 år (inga restvärden). Filterbyten ingick i kostandsanalysen av tilluftsradiatorer. Investeringskostander för isolering och tätning av byggnadens klimatskärm togs inte med i LCC analysen.

2 Utgångspunkter för renovation av värme- och ventilationssystem i äldre flerbostadshus

2.1 Energihushållning

Våren 2007 ställde sig EU:s stats- och regeringschefer bakom övergripande besparingsmål på primär energianvändning och koldioxidreduktion i byggnader på 20 % till år 2020.

Baserad på EU kraven och regeringens uppdrag ställer Boverkets Byggregler (BBR) riktlinjer och krav för energihushållning i svenska byggnader: ”Byggnader ska vara utformade så att energianvändningen begränsas genom låga värmeförluster, lågt kylbehov, effektiv värme- och kylanvändning och effektiv elanvändning”. Den specifika energianvändningen, ett mått på energianvändning per kvadratmeter bostadsyta, används vid jämförelse av energiförbruk mellan hus inom Sveriges klimatzoner. Kraven på specifik energianvändning vid nybyggnation redovisas i Tabell 1 och Figur 4 (de svenska målen baseras inte på primär energianvändning utan på köpt energi).

Byggnader i BBR anses ha ”annat uppvärmningssätt än elvärme” så länge den samlade installerade eleffekten för uppvärmning inte är större än 10 W/m^2 (A_{temp}).

För ändring eller tillbyggnad gäller samma kravnivå som vid nybyggnation. Kraven ställs dels på komponentnivå och dels på hela byggnaden vid ändring. Om byggnaden genomgår omfattande renovering där över 25 % av installationerna byts ut räknas det som ändring. Energimyndighetens nationella strategi och Boverkets kommande ombyggnadsregler har utlovats innebära ökade och tydligare krav på energiprestanda för att nå nationella energidirektiv. Energimyndighetens föreslagna målnivåer för renoveringar av byggnader för att främja NNE-standarden är redovisat i Tabell 1 [16].

Tabell 1. Krav i de Svenska byggreglerna (BBR 19, BFS 2011:26) och föreslagit NNE krav från Energimyndigheten. Nivåer avser högsta tillåtna energianvändning.

Klimatzon (Figur 1)	**1**	**2**	**3**
Bostäder som har annat uppvärmningssätt än elvärme			
Byggnadens specifika energianvändning, kWh/(m^2·år)	130	110	90
Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient (U-värde), W/(m^2·K)	0.40	0.40	0.40
Föreslagit NNE krav vid renovering från år 2021, kWh/(m^2·år)	105	90	75
Bostäder med elvärme			
Byggnadens specifika energianvändning, kWh/(m^2·år)	95	75	55
Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient (U-värde), W/(m^2·K)	0.40	0.40	0.40
Föreslagit NNE krav vid renovering från år 2021, kWh/(m^2·år)	70	55	40

Figur 4. Svenska klimatzoner (på engelska)

För äldre flerbostadshus går merparten av den specifika energianvändningen till uppvärmning, d.v.s. ersätta värmeenergi som försvinner ut ur byggnaden genom transmission, ventilation och ofrivillig ventilation, se ekvation 1. Vidare tillkommer uppvärmning av tappvarmvatten och elenergianvändning för drift av pumpar, fläktar och liknande, den så kallade fastighetselen. Hushållsel ingår inte i Boverkets angivna specifika energianvändning.

$$E_{uppv} = (Q_t + Q_v + Q_{ov}) \cdot G_t \qquad [Wh] \qquad (1)$$

där Q_t, Q_v och Q_{ov} står för energiförluster via transmission, ventilation och ofrivillig ventilation (betecknas också som läckage eller infiltration). G_t står för gradtimmar och är en summering av temperaturskillnaden mellan utomhus och gränstemperaturen, T_g, för alla årets timmar på den aktuella orten huset befinner sig på. Gränstemperaturen, T_g, är den temperaturnivå vilken värmesystemet i sig behöver åstadkomma för att skapa ett behagligt inomhusklimat. Temperaturskillnaden mellan T_g och normal innetemperatur täcks av gratisvärme så som interna värmelaster.

Den specifika energianvändningen, som är lika med E_{uppv} plus tappvarmvattenförbrukningen delat med uppvärmd boarea, förklarar vad energibehovet för uppvärmning blir beroende på klimatet på orten och gratisvärmetillskottet. Det är denna storhet som ofta är intressant för den enskilda fastighetsägaren. Den ger en uppfattning om kostnaden för uppvärmning och jämförelse med BBR-kravet. Vill man däremot jämföra värmeeffektbehovet för en viss byggnadstyp utan att inkludera ostadiga variabler som klimat, tappvarmvatten, solinstrålning och interna värmelaster är det bättre att utgå från de specifika värmeeffektförlusterna, Q_t, Q_v och Q_{ov}. I denna förstudie redovisas hur stor värmeförlust fallbyggnaderna har per uppvärmd boarea (Q/A_{temp}).

Den del av energianvändningen som går till att täcka ventilationsförluster respektive ofrivillig ventilation varierar kraftigt i flerbostadshus. Byggnadens täthet spelar stor roll. Principer för att minska denna del går ut på att kontrollera ventilationsgraden på lämplig nivå, återvinna energi i frånluften, effektivt värma inkommande ventilationsluft samt minimera andelen ofrivillig ventilation. System/komponenter för energieffektivisering som behandlas beskrivs i underrubriker som följer. Därefter följer en utredning om betydelsen av ofrivillig ventilation.

2.2 System som ingår i renoveringsförslagen i denna förstudie

2.2.1 Balanserad ventilation med värmeåtervinning (FTX-system)

FTX-system bygger på att det finns både till- och frånluftskanaler i huset. Där samlingskanalerna passerar varandra sitter en värmeväxlare som tar energi från frånluften och ger till tilluften, se Figur 3. Temperaturverkningsgraden beskriver återvinningen, se ekvation 2.

$$\eta_t = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} \qquad [-] \qquad (2)$$

där η_t är temperaturverkningsgraden, T_1 är uteluftens temperatur, T_2 är tilluftens temperatur efter växlaren och T_3 är temperaturen i frånluften före växlaren.

Temperaturverkningsgraden för moderna FTX-system varierar något. I denna förstudie har 83 % temperaturverkningsgrad antagits då utomhustemperaturen överstiger -2°C, och 75 % när det är kallare.

Nittio procent av småhusägarna som har mekanisk till- och frånluftsventilation med värmeåtervinning (FTX-system) är så nöjda att de rekommenderar andra att skaffa det. En tredjedel upplever dock problem med buller och lika många har inte besiktigat kanalerna sedan de installerades. Detta visar en ny enkätundersökning bland 110 småhusägare som Energimyndigheten (STEM) och Boverket har gjort. Läs mera om FTX-system hos Energimyndigheten [17].

2.2.2 Tilluftsradiator

En tilluftsradiator kombinerar värmetillförsel till rummet med förvärmning av inkommande ventilationsluft, se figur 3. Tilluftsradiatorer är anpassade för frånluftsventilerade byggnader. Drivkraften på luften är delvis undertrycket i byggnaden, men termik hjälper också till. Genom varje tilluftsradiator kommer typiskt 8-10 l/s vid 10 Pa undertryck i huset. Filtret hindrar smuts och partiklar att ta sig in i huset.

Traditionella radiatorer är gjorda för att stå i rumstemperatur, och de varma ytorna behöver hålla en temperatur upp till 30 °C över rumsluftens temperatur för att tillräcklig med värmeeffekt ska ges till rummet. I tilluftsradiatorer gör det faktum att den inkommande ventilationsluften kommer i direkt kontakt med värmeavgivande ytor att värmeöverföringen blir mycket effektivare: dels på grund av temperaturförhållanden och dels på grund av strömningsbilden. Resultatet blir att samma effekt kan ges till rummet med en lägre framledningstemperatur på vattnet i radiatorkretsen. I riktiga lågtemperatur-tilluftsradiatorer har dessutom den extra driftkraften på luften som strömmar mellan panelerna utnyttjats för att optimera lamellavståndet (avståndet mellan konvektionsfenorna).

På samma sätt som golvvärme kan tilluftsradiatorer utnyttjas i lågtemperatursystem och ge:

- Effektivare användning av värmepumpar
- Effektivare utnyttjande av fjärrvärme
- Effektivare utnyttjande av alternativa (uthålliga) energikällor

Till skillnad från golvvärme och de flesta andra tillgängliga lågtemperatursystem har tilluftsradiatorer följande kvaliteter:

- Snabb termisk respons (som underlättar reglering av uppvärmningen, ger möjligheter att utnyttja temperaturvariationer över dygnet och hjälper till att hålla stabil innetemperatur i byggnader med ”behovsstyrd ventilation”)
- Förvärmning av inkommande ventilationsluft säkerställer termisk komfort utan drag, ökad komfortzon och möjligheten att bibehålla önskad ventilationsgrad året om (i dagens byggnader tenderar hyresgäster att sätta igen sina friskluftsventiler på vintern). Läs om komfort med tilluftsradiatorer i ”Potential of Ventilation Radiators” av Myhren [10].
- Enkelt/förmånligt alternativ vid renovering av värme- och ventilationssystem för att tillmötesgå befintliga och kommande energi och miljökrav samt bevarandekrav (kräver lite utrymme)

Tilluftsradiatorer kan ingå i systemlösningar med andra typer rumsvärmare och olika typer av värmeproduktion. Ett projekt med nya radhus och villor som ligger utanför fjärrvärmenätet pågår i Ursvik, Stockholm, i ett STEM projekt i samarbete mellan Kungliga tekniska högskolan (KTH) och NCC [7]. Här har frånluftsvärmepumpar och kombinationen tilluftsradiatorer och golvvärme installerats i varje bostadsenhet för att skapa lågtemperatursystem.

Vid renovering av äldre hus med stort uppvärmningsbehov och stora radiatorer kan byte till tilluftsradiatorer inte möjliggöra lika stor sänkning av framledningstemperaturen. För att uppnå bra förutsättningar för lågtemperatursystem kan det i vissa fall vara lämpligt att komplettera med tilluftsradiatorer som tillägg till befintliga radiatorer om det finns plats.

Ett dilemma med vissa typer tilluftsradiatorer är att tilluften kan upplevas kall och dragig på vår och höst när utomhustemperaturen ligger kring gränstemperaturen för huset. Detta gäller speciellt nybyggda och renoverade hus där transmissionsförlusterna är små och interna värmelaster stora. Man vill inte gärna öka effekten på radiatorn för att värma inkommande luftflöde för då blir inomhustemperaturen för hög.
I denna typ av hus är det viktigt att tilluftsradiatorer inte är överdimensionerade, de ska framför allt vara värmare för inkommande luft inte för själva rummet. Vissa typer av tilluftsradiatorer har också en injektor där rumsluft inblandas i den inkommande kalla ventilationsluften för att undvika diskomfort.

Läs mera om tilluftsradiatorer i ”Potential of Ventilation Radiators” av J. A. Myhren och hos tillverkare [10,18].

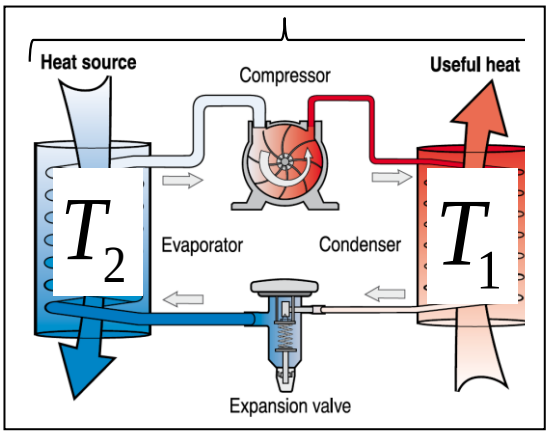
2.2.3 Frånluftsvärmepump (FX-system)

I hus med mekanisk frånluftsventilation kan en frånluftsvärmepump installeras för att ta tillvara på energin i den runt 20-gradiga luften som är i färd med att lämna byggnaden och sedan utnyttja denna energi för att effektivare värma tappvatten eller vatten i värmesystemet, se figur 3.

Typisk årlig värmefaktor för en frånluftsvärmepump är 3; för varje del el-energi som tillförs värmepumpen fås tre delar värmeenergi. Ekvation 3 visar sambandet och figur 5 visar en principskiss.

$$COP_h = \eta_{Ct,h} \frac{T_1}{T_1 - T_2} \qquad [-] \qquad (3)$$

där COP_h står för värmefaktor, $\eta_{Ct,h}$ är en konstant som representerar förluster i systemet, T_1 är temperaturen i kondensor och T_2 temperaturen i förångare (båda i Kelvin).



Figur 5 Principen för en värmepump (på engelska).

En frånluftsvärmepump utnyttjar värmen i frånluften för att värma vatten i huset. Värmepumpen består av fyra huvuddelar; förångare (evaporator), kondensor (condenser), expansionsventil (expansion valve) och kompressor (compressor). Dessa är förbundna med ett slutet rörsystem. I systemet cirkulerar ett köldmedium som i vissa delar av kretsen är i vätskeform och i andra delar i gasform. När trycket höjs i kompressorn höjs också temperaturen.

För att verkningsgraden skall bli så bra som möjligt skall energin hämtas vid så hög temperatur som möjligt (T_2) och tillföras vid så låg temperatur som möjligt (T_1). Fördelen med att hämta energi från frånluften är att den är en relativt varm och stabil värmekälla, nackdelen är att frånluftsflödet är begränsat.

Lågtemperaturuppvärmningssystem kan avge tillräckligt med värme för att värma byggnaden vid lägre framledningstemperatur än traditionella system. En värmepump blir 1,5-2,0 % mer effektiv för varje grad framledningstemperaturen kan sänkas under typisk nivå. För att kunna utnyttja lågtemperaturrumsvärmare maximalt krävs det att värmepumpen kan styra framledningstemperaturen beroende på uppvärmningsbehovet, värmepumpen har då en så kallad varvtalsstyrd kompressor med flytande kondenseringstemperatur.

Hus med frånluftsvärmepumpar räknas som el-uppvärmda och omfattas därför av de strängaste BBR-krav om installationerna använder mer än 10 W/m^2, se Tabell 1. I fjärrvärmda byggnader kan små frånluftsvärmepumpar installeras utan att byggnaden betraktas som eluppvärmd om den totala installerade eleffekten är lägre än denna nivå. Då pumpar och fläktar behöver el innebär det att kompressoreffekten på frånluftsvärmepumpen inte bör överskrida 7-8 W/m^2. Resterande värmebehov tillgodoses av fjärrvärmen.

Läs mera om frånluftsvärmepumpar på Energimyndigheten [17].

2.2.4 Markvärmepump

En markvärmepump fungerar i princip som en frånluftsvärmepump men hämtar istället värme från relativt ytliga slingor som ligger i jord på frostfritt djup. Att installera tilluftsradiatorer i hus med markvärmepump är mest effektivt om värmepumpen har flytande kondenseringstemperatur. I denna förstudie har typiska indata för en sådan modern markvärmepump används, se kapitel ”3.2 Hovgården”. Läs mera om markvärmepumpar hos Energimyndigheten [17].

2.2.5 VBX-modul

En VBX-modul är en värmeväxlare som möjliggör frånluftsåtervinning i kombination med berg- eller jordvärmepump. I stället för att installera ytterligare en värmepump hjälper VBX-modulen den befintliga värmepumpen till bättre verkningsgrad dels genom att värma inkommande köldbärare och indirekt genom att återladda värmepumpens värmekälla. Värmeväxlaren ansluts till husets frånluftskanal, oftast på vinden, och vattenrör från värmeväxlaren dras till värmepumpens kalla sida. Utbytet blir att temperaturen på köldbäraren från energikällan höjs i genomsnitt runt 3-4 ℃ så att temperaturen i förångaren blir högre, se T_2 i Figur 5.

Jämfört med FTX-system blir installation av VBX-modul flexibel och billig om huset redan har frånluftskanaler men saknar tilluftskanaler. VBX-moduler är inte vanligt i flerbostadshus, men teoretisk ska inte installation i just flerbostadshus vara någon begränsning. VBX-modulen är särskilt gynnsam i kombination med markvärme, om borrhål i bergvärme är för grunda eller om flera borrhåll står nära varandra. En VBX-modul är ett effektivare alternativ än solfångare för att återladda borrhål då temperaturförhållanden också kan förbättras under vintern [19]. För att VBX-modulen ska fungera optimalt krävs stor ackumulatortank som värmebuffert och/eller effektiva rumsvärmare så som tilluftsradiatorer, därför medtogs jämförelse med VBX modul i denna förstudie. Läs mera om VBX-moduler i pilotstudie av P. Fahlén eller hos tillverkaren IVT [19, 20].

Vid modellering av VBX-modulen användes grundvärdena för modellen i TMF Energi.

2.2.6 Fjärrvärme

Fjärrvärme innebär att husen i hela eller delar av städer kopplas samman i ett gemensamt kulvertnät (nätverk av nedgrävda ledningar för varmt vatten). Värmen produceras i ett centralt värmeverk eller en central kraftvärmeanläggning. Kraftvärme innebär att både el och värme kan produceras samtidigt. Läs mera om fjärrvärme hos Energimyndigheten [17].

2.2.7 Solvärme

En solvärmeanläggning värmer vatten med hjälp av solen. Varmvattnet kan användas för tappvarmvatten eller som ett tillskott till uppvärmningen i huset. Läs mera om solvärme hos Energimyndigheten [17].

2.2.8 Behovsstyrd ventilation

Med moderna fläktar kan ventilationsflödet anpassas efter behov, beroende på personbelastning eller fuktgenerering. Regleringen kan ske vid hjälp av sensorer eller tidsstyrning. Nya BBR öppnar för att ventilationsflödet kan sänkas från 0,35 l/sm^2 till 0,10 l/sm^2 i rum där inga personer vistas [1].

I denna förstudie antogs det att funktionalitet för behovsstyrning av ventilation med tidsstyrning enkelt kunde implementeras i alla mekaniska ventilationssystem som undersöktes. Ventilationsgraden sänktes i hela bostaden 10 timmar per dygn.

2.3 Betydelsen av ofrivillig ventilation för renovering

2.3.1 Oavsett ventilationssystem så har vi luftläckage

Som beskrivits i kapitel 2.1 står ofrivillig ventilation (Q_{ov}) för en betydande del av uppvärmningsbehovet. Infiltration genom byggnadsskalet påverkar inte bara energianvändningen men också hur väl ventilationssystem fungerar!

I denna förstudie definieras infiltration som luften som tar sig in genom otätheter i byggnadsskalet på grund av vindpåblåsning eller tryckskillnad mellan inne och ute, medan ofrivillig ventilation är den del som passerar in och ut genom byggnadsskalet utan att fångas upp av något ventilationssystem.

I ett äldre otätt självdragsventilerat hus är undertrycket som skapas av skorstensverkan typiskt på några Pascal. Tillsammans med vindgenomblåsning kan denna drivkraft ändå vara tillräcklig för att tillgodose huset med frisk luft. Den nya luften tar sig helt enkelt in genom otätheter i byggnadsskalet, vandrar genom huset och stiger ut genom skorstenen på grund av temperaturskillnaden mellan inne- och uteluft. Denna systemlösning baserar sig med andra ord helt och hållet på termisk drivkraft och infiltration. Man vill ha läckage i ett hus med självdrag, men varken för mycket eller för lite. Det är därför viktigt att byggnadsskalet på äldre självdragsventilerade hus inte blir för täta. Om man eldar i skorstenen eller inte, spelar stor roll för drivkraften i ventilationen.

Läckageflödet i sig ger inte upphov till extra energianvändning i självdragsventilerade hus så länge flödet är inom rimlig storlek. Drivkraften på ventilationsflödet kan dock lätt förändras mycket med årstiderna, se ekvation 4. På sommaren kan det vara en utmaning att få in tillräckligt med frisk ventilationsluft om man inte öppnar fönster och dörrar. På vintern då temperaturdifferensen mellan ute och inne är stor kan det vara tvärtom. Då skapar större temperaturskillnader ökad termisk drivkraft som gör att huset kan bli överventilerat. Undertryck på över 10 Pa är vanligt. I figur 8 kan det utläsas att en byggnad med lufttäthet på q_{50}=1,3 l/sm^2, motsvarande Hovgården, får ungefär 0,5 h^{-1} vid 10 Pa undertryck, vilket är i linje med BBR kravet. Är det ännu större otätheter eller uppstår högre undertryck kommer ventilationen överskrida denna nivå. Det extra flödet med kall vinterluft som kommer in kostar mycket att värma upp.

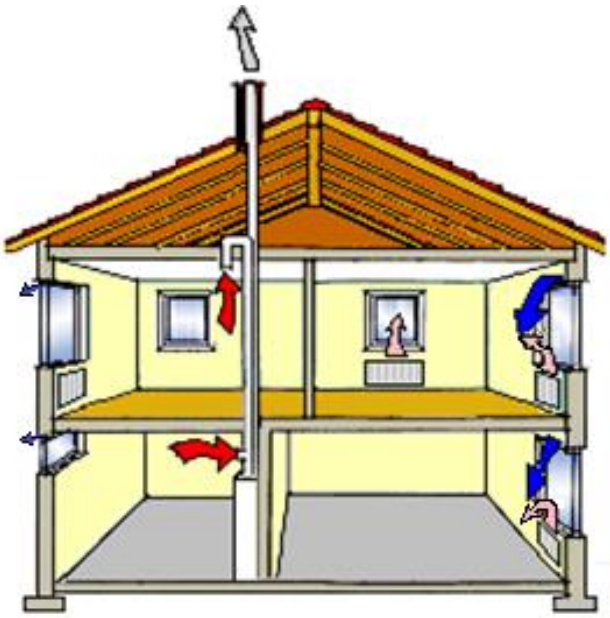
$$\Delta p = 0{,}0465 \cdot \Delta T \cdot H \qquad [\text{Pa}] \qquad (4)$$

där Δp är termisk drivkraft, ΔT är temperaturskillnad och H är höjdskillnad

I ett modernt hus med tjock isolering, tätskikt och bättre fönster kommer den naturliga läckagegenomströmningen att vara betydlig lägre. Därför har man i nya hus istället gått över till mekanisk frånluftsventilation (F) eller balanserad ventilation (FTX) för att ge tillräckligt med

luftomsättningar. Frånluftsventilation bygger på att en fläkt evakuerar gammal luft i badrum och kök och samtidig skapar ett undertryck på ungefär 10 Pa som gör att ny luft sugs in genom egna ventilationsspringor i byggnadsskalet. Tyvärr kommer det alltid okontrollerad infiltration in i byggnaden på grund av vind och undertrycket i byggnaden även med frånluftssystem. Det kommer alltid finnas några små sprickor för luften att ta sig in genom! Infiltrationen är illustrerad med mörkblått i Figur 6. Precis som i figuren kommer infiltration ofta in runt fönster, men infiltrationsluften kan också komma på andra ställen.

Fördelen med frånluftsventilation är att största delen av infiltrationsluften tar samma väg ut genom fläkten som den vanliga ventilationen, bara en liten del försvinner ut som exfiltration. Med frånluftsystem (F eller FX) blir en stor del av infiltrationsluften alltså kontrollerad ventilation! Därför har man både möjligheten att återvinna värme och kontinuerligt kontrollera ventilationen på samma nivå för att undvika överventilering med hjälp av moderna tryckstyrda frånluftsfläktar.



Figur 6. Illustration av infiltration (stora blå pilar) och ofrivillig ventilation (små blå pilar).

I FTX system finns det i supplement till frånluftsfläkten en egen fläkt och ett eget kanalsystem för att ta in frisk ventilationsluft. Med denna lösning skulle man i princip kunna säkerställa att så mycket luft som möjligt passerar FTX-aggregatet för att undvika någon större tryckskillnad mellan inne och ute. Ändå är det så att frånluftsfläkten får jobba lite hårdare än tilluftsfläkten för att skapa ett litet undertryck i byggnaden på upp mot 5 Pa. Detta undertryck gör att fuktig inomhusluft inte får möjlighet att tränga ut i byggnadsskalet och skapa fuktproblem.

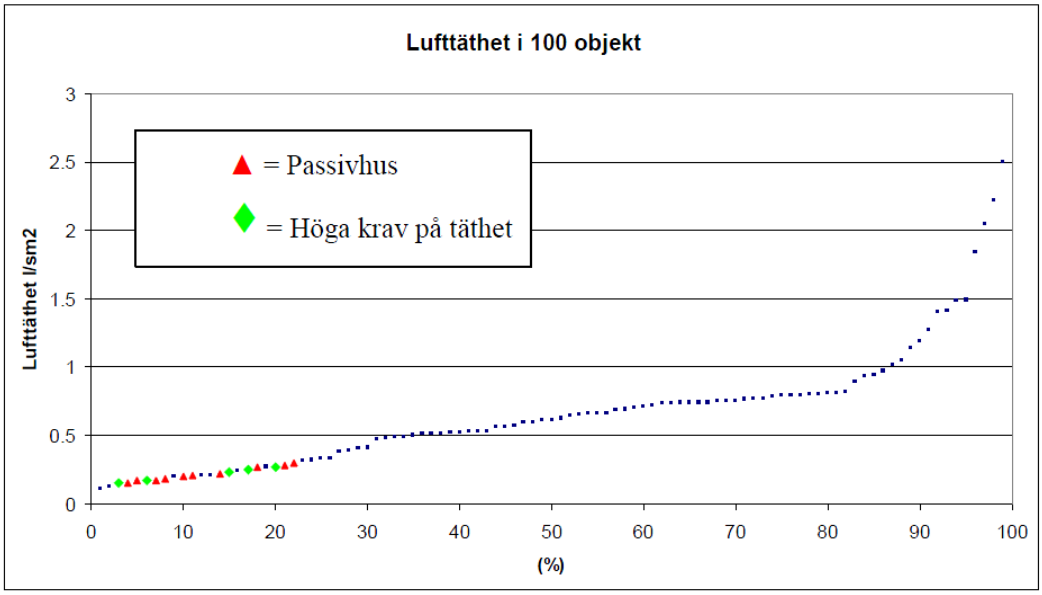
FTX är känsligare än FX för infiltration. Ju större undertrycket är i hus med FTX-ventilation, ju mera infiltrationsluft passerar aldrig tilluftskanalerna i FTX-aggregatet. Ju lägre undertrycket är, desto större del av infiltrationen orsakad av vindpåblåsning passerar båda in och ut genom byggnadsskalet. FTX-systemet återvinner självklart bara energi i luften som passerar aggregatet, inte energi i luften som passerar in och ut genom sprickor i huset utan att någonsin passera växlaren. Denna del blir ofrivillig ventilation. Fördelningen mellan ventilation och ofrivillig ventilation är därför viktigt att kartlägga för att kunna bedöma hur husets energiprestanda kommer att bli vid installation av ventilationssystem.

2.3.2 För att begränsa ofrivillig ventilation har vi normer

Det är känt att den ofrivilliga ventilationen spelar stor roll för energieffektiviteten och sedan sjuttio/åttiotalet byggs våra byggnader tätare än förut. Det sätts krav på lufttätheten genom nationella byggregler i alla nordiska länder. Boverkets Byggregler (BBR) har i Sverige dock tagit bort en del krav. I dag finns enbart krav på lufttäthet i passivhus [21]. Detta krav beskriver att omslutande byggnadsskal får läcka maximalt 0,3 l/sm^2 vid q_{50}, en betäckning på tryckprov där huset trycksätts till 50 Pa. Det bestämdes att byggnader skall trycksättas till hela 50 Pa för att noggrant kunna jämföra olika byggnader utan att yttre krafter så som vindpåblåsning skall påverka resultatet nämnvärt. Standarden ISO 9972/EN 13829 är framtagen för att beskriva hur trycktestning av byggnader skall gå till.

2.3.3 Tryckprovning av befintliga flerbostadshus

Även om krav på byggnaders lufttäthet har kommit och gått görs få uppföljningsprov i Sverige, de flesta tryckprovningar görs på helt nya byggnader. Figur 7 visar resultat från lufttäthetsprovningar i 100 objekt uppförda sista decenniet [22]. Denna undersökning inkluderade flerbostadshus, villor, skolor och förskolor och både lätta och tunga konstruktioner finns representerade. I en annan undersökning gjord i flerbostadshus av Energimyndighetens beställargrupp för energieffektiva flerbostadshus (BeBo) var medelvärdet för de provade lägenheterna ca 0,6 l/sm^2 vid q_{50} [23].



Figur 7. Resultat från täthetsprovningar gjorda 2009

Lufttätheten i äldre flerbostadshus har troligtvis stor spridning och är beroende på flera faktorer såsom byggteknik och brukarvanor. Tyvärr finns det ingen statistik från äldre flerbostadshus. Trycktestning av befintliga flerbostadshus är nämligen svårt. Störst noggrannhet får man vid tryckprovning av hela byggnader. I flerbostadshus krävs att man får tillträde och kan göra förberedelser i alla lägenheter vilket blir ganska omfattande. Om flerbostadshuset är relativt otätt kan det totalt sett bli väldigt stora luftflöden.

Tryckprovning av enskilda lägenheter i flerbostadshus görs, men givetvis är det svårt att bedöma hur stor andel av läckaget som kommer genom ytterskalet och hur mycket som läcker in från

intilliggande lägenheter. Om fläkten blåser ut luft i trapphus påverkas dessutom tryckskillnaden över fläkten mer än om luft blåses ut utomhus.

Tryckprovning i syfte att förbättra lufttätheten i byggnadsskalet bör kombineras med termografering för att lokalisera och kunna åtgärda större läckageställen.

2.3.4 Att beräkna operativ ofrivillig ventilation

Med tuffare energikrav blir det allt viktigare att få koll på den ofrivilliga ventilationen. Trots detta används sällan vedertagna metoder för att uppskatta den ofrivilliga ventilationen vid operativt undertryck. Schablonmetoder som används vid energiberäkningar är bristfälliga.

Statistik från lufttäthetsprovningar visar att infiltrationen och tryckskillnaden mellan ute och inne följer ett näst intill exponentiellt samband, se Ekvation 5 [24].

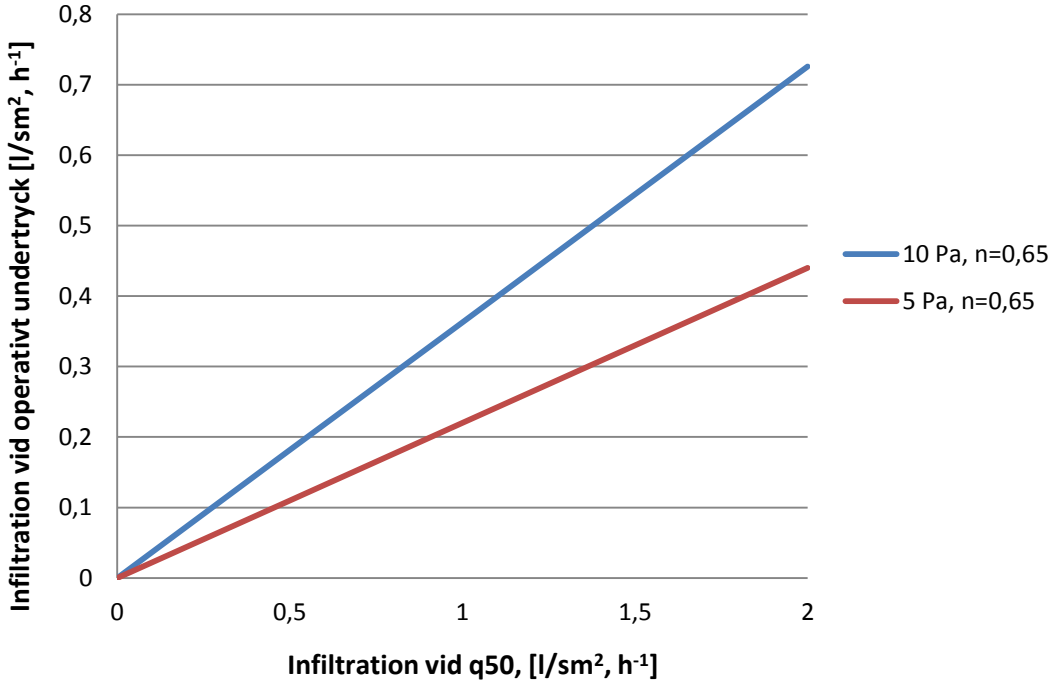
$$läckage\ vid\ X\ Pa = \frac{läckage\ vid\ q50}{\left(\frac{50}{X}\right)^n} \qquad [l/s] \qquad (5)$$

där exponenten n är beroende av storleken på läckagespringor i byggnaden i mm (vanligtvis lika med 0,65)

Baserat på ekvation 5 har sambandet mellan lufttäthet vid provtryckning och infiltration vid operativt undertryck beräknats och presenterats i Figur 8 för två typiska undertrycksnivåer, 10 Pa, vilket är typisk vid FX, och 5 Pa undertryck, vilket är typiskt vid FTX. Har man ett frånluftsystem kommer mer luft in genom infiltration, men en stor del av infiltrationen fångas också upp av frånluftssystemet som beskrivit i 2.3.1.

I figur 8 framgår det att ett hus med lufttäthet motsvarande 0,6 h^{-1} vid provtryckning får typiskt en infiltration på 0,1-0,2 h^{-1} vid operativt undertryck; ungefär 20-40 % av luftflödet vid vanlig ventilationsgrad. På nittiotalet hade BBR ett krav om att hus med FTX inte skulle ha sämre lufttäthet än 0,6 l/sm^2 vid q_{50}.

Skall man installera tilluftsradiatorer påverkar lufttätheten dimensioneringen av systemet, detta diskuteras i 2.3.5.



Figur 8. Förhållandet mellan uppmätt infiltration vid 50 Pa undertryck (q_{50}) och infiltration vid operativt undertryck.

Det är inte bara undertrycket som skapas av ventilationssystemet som kan ge upphov till infiltration, vindbelastningen påverkar också. I FEBY:s kravspecifikation för nollenergihus, passivhus och minienergihus används en ekvation för att beräkna ofrivillig ventilation med vindbelastningen inkluderat [21]. Den ofrivilliga ventilationen, q_{ov}, beräknas med hänsyn till byggnadens läge och ventilationens balansering. Ekvationen som kommer från standarden EN ISO 13789:2008 används för att beräkna ofrivillig ventilation i denna undersökningen.

$$q_{ov} = q50 \cdot e / (1 + f/e\ ((q_{sup} - q_{ex})/ q50)^2) \qquad (6)$$

där $q_{sup} - q_{ex}$ är luftöverskottet mellan tilluft, q_{sup}, och frånluft, q_{ex}, [l/s], $q50$ är läckflödet vid 50 Pa tryckskillnad mellan inne och ute [l/s] och e och f är vindskyddskoefficienter enligt tabell 2.

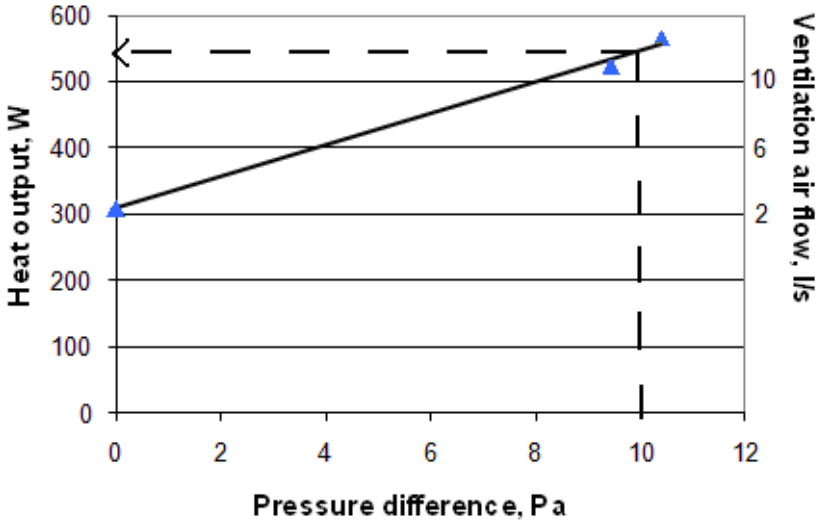
Tabell 2 Vindskyddskoefficienter enligt EN ISO 13789:2008.

Vindskyddskoefficienter e och f Koefficient e för avskärmningsklass	Flera sidor exponerade	En sida exponerad
Ingen avskärmning. Öppet landskap eller höga byggnader i staden	0,10	0,03
Måttlig avskärmning. Förortsmiljö, landskap med träd eller andra byggnader	0,07	0,02
Kraftig avskärmning. Byggnad i skog eller med genomsnittshöjd i city	0,04	0,01
Koefficient f	15	20

2.3.5 Infiltrationens påverkan på tilluftsradiatorer

Tilluftsradiatorn är en installationsenhet vars prestanda indirekt kan påverkas av infiltration. Värmeavgivningen från en tilluftsradiator sker i största grad genom konvektionsvärmeöverföring till luften som passerar mellan panelerna. Mängden luft som passerar spelar stor roll, därför också undertrycket i byggnaden. I ett otätt frånluftsventilerat hus fås tillräckligt med ventilation vid ett lågt undertryck, helt enkelt för att en stor del av ventilationen kommer in genom otätheter som infiltration och inte genom tilluftsradiatorerna. Lägre luftflöde genom tilluftsradiatorn ger lägre effekt vilket gör att det måste kompenseras genom högre vattentemperatur alternativt större flöde. Detta leder till högre energianvändning. Figur 9 visar hur effekten från en tilluftsradiator varierar med undertrycket i byggnaden [10].

En viktig fråga i denna förstudie är att belysa om äldre flerbostadshus är tillräckligt täta för att implementering av tilluftsradiatorer ska vara effektivt och lönsamt.



Figur 9. Effekt från en tilluftsradiator (500*600 mm, modul 21) som funktion av undertrycket i byggnaden. Framledningstemperatur 55 °C och 0 °C utomhustemperatur.

3 Fallstudier

Under följer presentation av fallstudierna för fastigheterna **1) Bergsätravägen** och **2) Hovgården** med resultat, livscykelanalyser (LCC-analyser) och tillhörande diskussion. Systemen som ingår i renoveringspaketen är beskrivna i kapitel 2.2.

3.1 Bergsätravägen (Grycksbo i Dalarna)

Figur 10. Bergsätravägen vintertid.

Flerbostadshuset rymmer 14 lägenheter och blev byggt på 50 talet, dvs. innan Miljonprogrammet. Ändå är huset väl representativt för Miljonprogrammet med hänsyn till valt uppvärmnings- och ventilationssystem. Byggnaden värms via fjärrvärme med traditionella radiatorer. Lägenheterna ventileras via separata frånluftsfläktar placerade i spiskåpan i köket samt i badrum.

Byggnadstekniken liknar också Miljonprogrammets. Miljonprogramshusen byggdes oftast av lättbetongelement med sparsamt isolerade väggar, oftast utan eller med bara 100 mm isoleringsmaterial [25]. Bergsätravägens ytterväggar består av murverk av 260 mm lättbetongblock med putsad insida och utsida. Isoleringsmaterial fattas alltså helt, vilket gör att isoleringsgraden blir lite sämre än för ett typiskt Miljonprogramshus. U-värdet för ytterväggen beräknades till 0,41 W/m^2K.

På många Miljonprogramshus har vissa byggnadsdelar så som fönster och dörrar blivit bytta till högre standard. Fönster i Bergsätravägen är av typen kopplade 2-glas. Balkongdörrarna är av äldre typ i relativt dåligt skick, medan entrédörrarna är utbytta till moderna dörrar med isolerglasrutor.

Källarmuren är i 300 mm gjuten betong. Vindsbjälklaget består av en armerad betongplatta med isolering av koksaska och spån. Bottenplatta av gjuten betong utan singelbädd.

Medel U-värdet för huset, U_m, beräknades utifrån besiktning av byggnaden samt efter erfarenhetsvärde utifrån ålder och byggnadstyp till 0,65 kWh/m^2.

Frånluftsfläktarna kan regleras manuellt i 3 hastigheter. Ventilationsgraden bedömdes via konsult ligga i linje med BBR kravet på 0,35 l/sm^2. Lufttätheten uppskattades till 1,2 l/(s·m^2) omslutande area.

I åtgärdspaketen för Bergsätravägen undersöktes följande åtgärder:

FX-ventilation
En så pass liten frånluftsvärmepump att huset fortfarande inte räknas som eluppvärmt återvinner energi i frånluften.

FX-ventilation + Lågtemperatur-tilluftsradiatorer
En så pass liten frånluftsvärmepump att huset fortfarande inte räknas som eluppvärmt återvinner energi i frånluften. Utbyte av hälften av de traditionella radiatorerna till tilluftsradiatorer.

Lågtemperatur-tilluftsradiatorer
Utbyte av hälften av de traditionella radiatorerna till tilluftsradiatorer.

FTX-ventilation
Installation av FTX-system.

FTX-ventilation + Solvärme
Installation av FTX-system samt en mindre solfångaranläggning som komplement till båda värme- och varmvattenproduktion.

Solvärme
En mindre solfångaranläggning som komplement till båda värme och varmvattenproduktion.

Bergvärmepump + FTX-ventilation
En bergvärmepump täcker största delen av uppvärmningsbehovet medan fjärrvärmen behålls som spets samt installation av FTX-system.

Bergvärmepump + Lågtemperatur-tilluftsradiatorer
En bergvärmepump täcker största delen av uppvärmningsbehovet medan fjärrvärmen behålls som spets. Lågtemperatursystem skapas med tilluftsradiatorer och FTX-system installeras.

3.1.1 Indata för beräkning i TMF Energi samt LCC-analys

Nedan följer en lista över byggnadsfysikaliska data för byggnaden som använts, specifikationer över relevanta installationer (som nya och rena), klimatdata, brukarindata till beräkningsprogrammet TMF Energi och indata till LCC-analysen.

Klimat

- Klimatzon 2
- Genomsnittlig utomhustemp: 4,2 °C

Byggnad och installationer

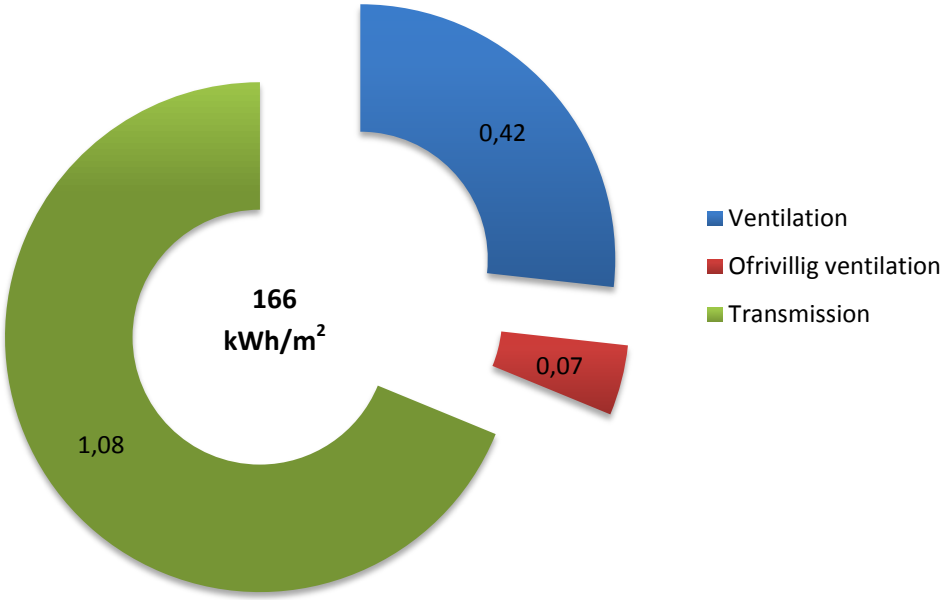
- Ventilationsflöde: 0,35 l/sm^2, vilket motsvarar ungefär 0,51 h^{-1}
- Inomhustemp.: 21°C
- U_m: 0,65 W/m^{2}K
- Lufttäthet: 1,2 l/(s·m^2) omslutande area vid *q50*, vilket med dagens systemlösning ger en ofrivillig ventilation på ungefär 0,08 l/(s·m^2) A_{temp} eller 0,12 h^{-1}
- Tappvarmvatten per person och år (60 °C): 14m^3 vilket tillsvarar 25 kWh/m^2 A_{temp}
- Gränstemperatur: 15,9 °C
- Måttlig avskärmning från vind
- Frånluftsvärmepump: Verkningsgrad (COP) 0/55 °C =1,8 0/45 °C = 2,4 0/35 °C = 2,8,
- Framledningstemperatur med 4 lågtemperatur-tilluftsradiatorer och DVUT: 52 °C med *q50*=1,2 l/(sm^2), 48 °C med *q50*=0,9 l/(sm^2) och 44 °C med *q50*=0,5 l/(sm^2)
- Solvärme: solfångare med täckningsgrad varmvatten: 40 %, täckningsgrad värme: 10 %
- Bergvärmepump: Verkningsgrad (COP) 0/45 °C = 3,5, 0/35 °C = 4,5

LCC-analys

- Livslängd alla installationer: 15 år
- Realkalkylränta per år: 5 %
- Energiprisökning real, per år: 2 %
- Pris el: 1 kr/kWh
- Pris olja: 1,5 kr/kWh
- Investeringskostnader för åtgärder redovisas med blå staplar i figur 14.

3.1.2 Resultat

Det totala energibehovet för uppvärmning exklusive tappvatten beräknades till 166 kWh/m^2. Figur 11 visar fördelningen mellan transmissions-, ventilations- och ofrivilliga ventilationsförluster. Energianvändningen inklusive tappvatten (den specifika energianvändningen) beräknades för hand till 191 kWh/ m^2.

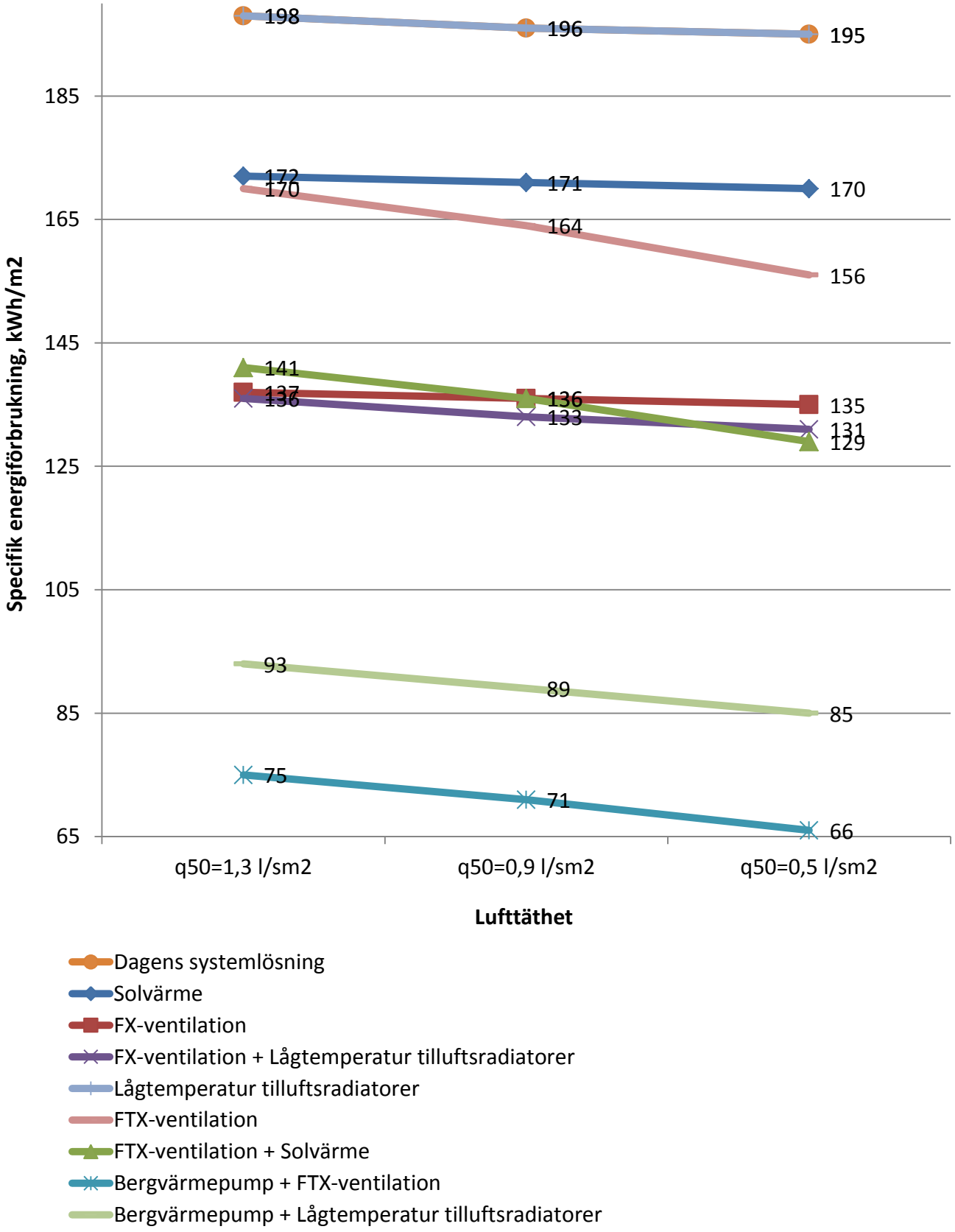


Figur 11. Energibehov för uppvärmning av Bergsätravägen (tappvatten exkluderat). Specifika värmeeffektförluster per A_{temp}: Q_v/A_{temp}=0,42 W/(m^{2}K), Q_{ov}/A_{temp}=0,07 W/(m^{2}K) och Q_t/A_{temp}=1,08 W/(m^{2}K).

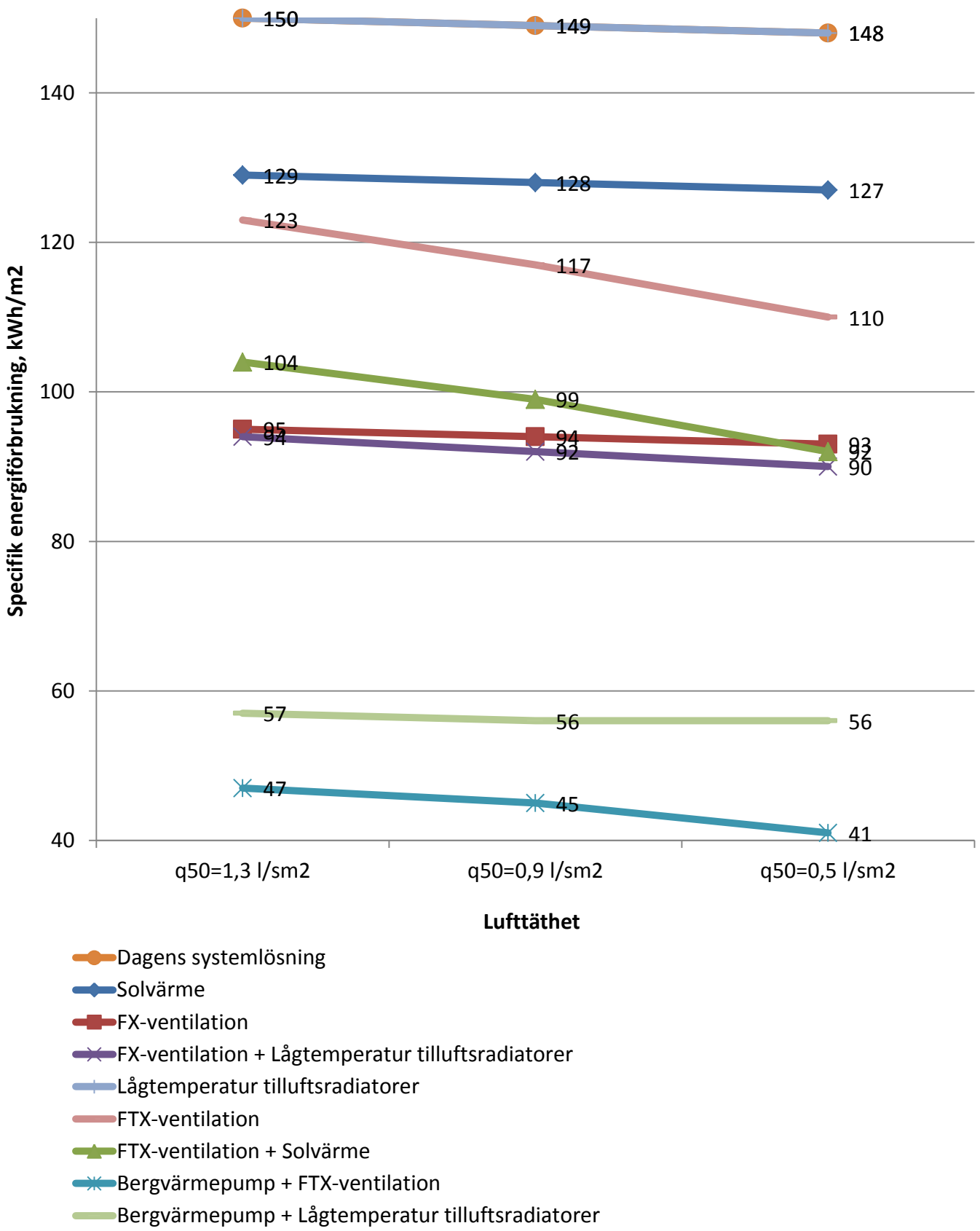
Uppmätt energianvändning för byggnaden år 2012 var 199 kWh/ m^2. Figur 12 visar att beräkningen av dagens systemlösning i TMF Energi låg precis i närheten, se den orange markören på 198 kWh/ m^2 helt överst och till vänster i diagrammet. Denna nivå var utgångspunkten för att undersöka renoveringsåtgärderna som redovisas i samma figur. Alla markörer till vänster baseras på dagens täthetsgrad. Markörerna i mitten och till höger grundas på att lufttäthet förbättras till q50=0,9 l/(sm^2) respektive q50=0,5 l/(sm^2).

Kravnivå på specifik energianvändning för nya bostäder med annat uppvärmningssätt än elvärme är 110 kWh/(m^2·år) i den aktuella klimatzonen med nuvarande BBR19. I fallen där fjärrvärmen kompletteras med bergvärmepump är kravet 75 kWh/(m^2·år). Föreslagit NNE-krav från Energimyndigheten vid renovering från år 2021 är 90 kWh/(m^2·år) respektive 55 kWh/(m^2·år).

Figur 13 visar energianvändningsnivåer där byggnadens isoleringsgrad samtidig har förbättrats till U_m=0,45 W/m^{2}K.



Figur 12. Specifik energianvändning med olika renoveringsåtgärder.

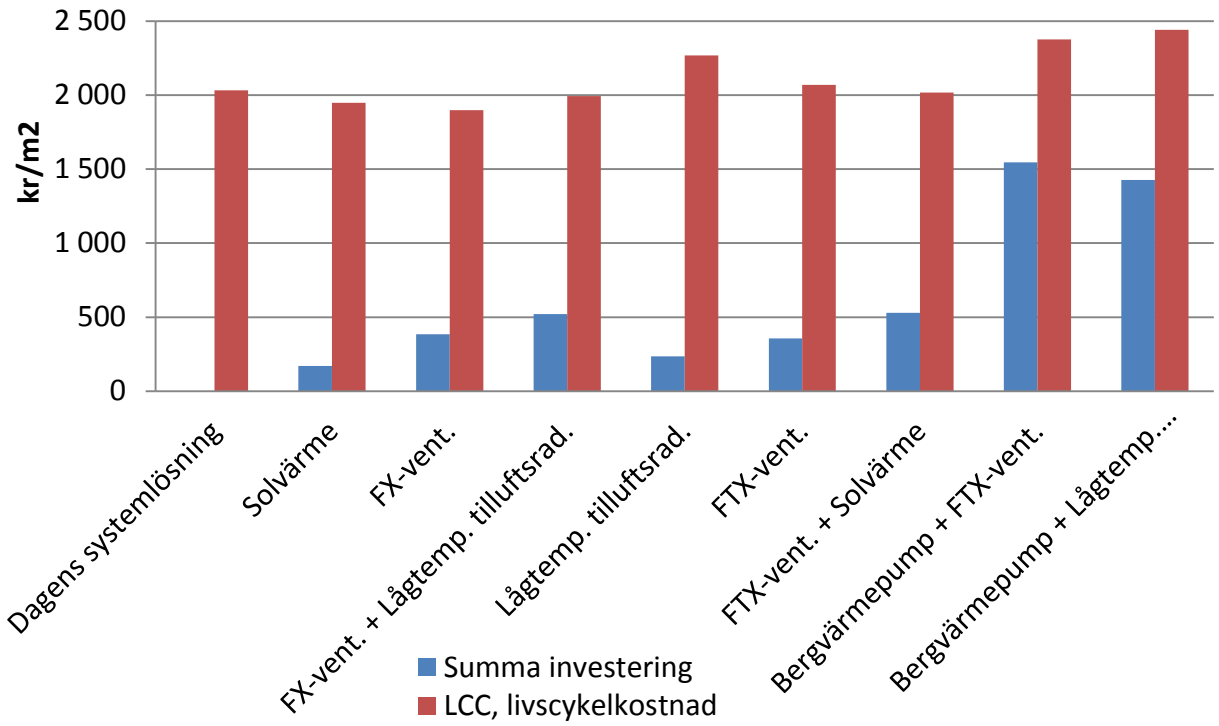


Figur 13. Specifik energianvändning med olika renoveringsåtgärder. I detta diagram har byggnadsskalets isoleringsgrad förbättrats till U_m=0,45 W/(m^{2}K).

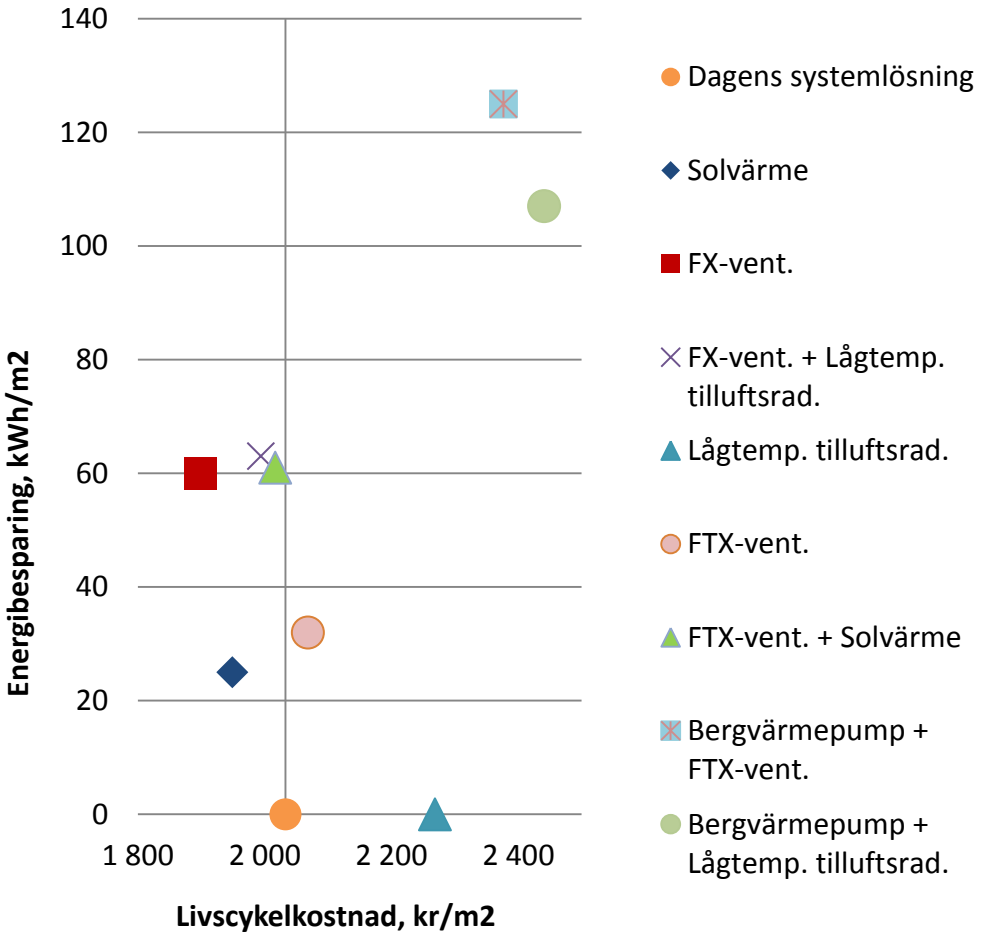
3.1.3 Kostnadsanalys

Utgångspunkten för kostnadsanalysen var Bersätravägen i existerande skick med dagens systemlösningar med befintliga frånluftskanaler och fjärrvärmesystem men med lufttäthet förbättrat till 0,9 l/sm^2 vid q50. Investeringskostnader för de undersökta åtgärdspaketen med tillhörande livscykelkostnad (LCC) är presenterat i figur 14 (engångsinvesteringar). Med livscykelkostnaden menas här den totala kostanden som krävs med respektive åtgärdspaket i 15 år räknat med dagens penningvärde, investeringskostnader och ackumulerade kostnader för köpt energi har alltså summerats. ”Dagens systemlösning” är synonymt med ”ingen åtgärd”.

Figur 15 klargör sambandet mellan energibesparing och livscykelkostnad för varje enskilt åtgärdspaket. Dagens systemlösning gav livscykelkostnaden 2033 kr/m^2 och år. Åtgärdspaketen till vänster om dagens systemlösning ger lägre livscykelkostnad per år. Ju högre upp i diagrammet ju större besparing ger åtgärdspaketet.



Figur 14. Investeringskostander (blått) och livscykelkostnad (rött) för olika åtgärdspaket.



Figur 15. Förhållande mellan energibesparing och livscykelkostnad för varje undersökt åtgärdspaket. Besparing till halverad energianvändning kräver energibesparing på minst 99 kWh/m^2.

3.1.4 Diskussion

Flerbostadshuset Bergsätravägen har en fördelning mellan transmissions-, ventilations- och ofrivilliga ventilationsförluster som är ganska typisk för denna typ av byggnad men också för många sk Miljonprogramshus, vilket gör jämförelsen mellan renoveringspaketen är relevant för ett stort byggnadsbestånd.

Byte till lågtemperatursystem gör inte att husets energibehov minskar, men möjliggör däremot effektivare värmeproduktion och lägre förluster i distributionen av värme. Med traditionell fjärrvärme syns därför ingen förändring mellan **Dagens systemlösning** och **Lågtemperatur-tilluftsradiatorer** i Figur 13 (båda 198 kWh/m^2). Huset måste fortfarande ”matas” med samma energimängd. Byte till Lågtemperatur-tilluftsradiatorer gynnar däremot fjärrvärmeverket då lösningen ger lägre returtemperatur i rörnätet. Vissa fjärrvärmeleverantörer så som Mälarenergi premierar systemlösningar som ger låg returtemperatur med lägre taxa. Vissa fjärrvärmeleverantörer så som Falun Energi och Vatten öppnar dessutom för att fastigheter som har lågtemperatursystem och lågt värmebehov får koppla sig på nätets returledning och få lägre taxa. Returvattnet som är på väg tillbaka till värmeverket kan fortfarande vara tillräckligt varmt för att värma denna typ av

byggnad. **Lågtemperatur-tilluftsradiatorer** hjälper alltså nödvändigtvis inte till att nå energikraven, däremot att skapa ett mera hållbart samhälle ur primärenergisynpunkt. Ett exempel på en returkopplad fastighet är ”Hyttkammaren”, det kommunala fastighetsbolaget Kopperstadens fastighet i Falun. Denna förstudie har lett till att lågtemperatursystem i fjärrvärmenät ska undersökas som en del av ett doktorandprojekt, se kapitlet om ”Förslag till vidare forskning”.

Besparingen som lågtemperatursystem kan ge blir mera greppbar och lönsam för fastighetsägaren i kombination med värmepump. Ju lägre framledningstemperatur ju bättre verkningsgrad får värmepumpen. I fallet med den lilla frånluftsvärmepumpen och tilluftsradiatorer i kombination fjärrvärme svarar inte tilluftsradiatorerna i sig för så stor besparing, tilluftsradiatorerna möjliggör däremot en FX-lösning med god termisk komfort då tilluftsradiatorerna möjliggör förvärmning av ventilationsluften. Denna lösning, **FX-ventilation + Lågtemperatur-tilluftsradiatorer,** hamnar på 136 kWh/m^2, en reduktion till 67% av den ursprungliga energianvändningen. Nybyggnadskravet i BBR19 för denna lösning är 110 kWh/m^2.

Byts däremot största delen av fjärrvärmen ut mot en bergvärmepump blir den extra besparingen med lågtemperatur-tilluftsradiatorer signifikant, **Bergvärmepump + Lågtemperatur-tilluftsradiatorer** ger en energianvändning på 93 kWh/m^2. Åtgärden ger en stor besparing, dock bedöms inte denna lösning vara kostnadsmässigt lönsam i detta hus då investeringskostnaden är så pass hög, se Figur 14.

Utan åtgärder på byggnadsskalet är **Bergvärmepump + FTX-ventilation** det enda renoveringspaketet som gör att byggnaden klarar nybyggnadskravet (precis 75 kWh/m^2). Görs däremot byggnadsskalet tätare samtidig som isoleringsgraden förbättras till U_m=0,45 W/(m^{2}K) är det flera renoveringspaket som sänker energianvändningen till ungefär halva ursprungliga energianvändningen, vilket också är avsevärt under nybyggnadskravet och i närheten av föreslagit NNE-krav vid renovering. Isoleringen i sig sänker energianvändning med 25 % och gör samtidig att värmepumparna får större täckningsgrad. Kostnader för isolering och tätning av byggnadsskal inkluderades inte i förstudien.

Oavsett isoleringsgrad presterar paketen med **FX-ventilation** bättre än enbart **FTX-ventilation** när det gäller energiförbrukning**.** För att nå samma nivå med **FTX-ventilation** som **FX-ventilation** krävs också **Solvärme**. **Solvärmen** i sig har bedömts vara ekonomiskt lönsamt jämfört med andra åtgärder i denna studie (se Figur 15). Precis samma slutsats gjordes i studien på elva flerbostadshus i Gävleborgs län[5].

Vilket av FTX eller FX som är mest fördelaktigt rent kostandsmässigt pågår det debatt om i branschen. Trots att tilluftskanaler behöver läggas till i FTX-system har investeringskostnaden för **FTX-ventilation** bedömts lägre än för **FX-ventilation** i denna studie. Ändå får **FX-ventilation** lägre livscykelkostnad än både dagens lösning och FTX-systemet. Återbetalningstiden för **FX-ventilation** beräknades till ca 5 år (5% realkalkylränta).

Lösningar med **FX-ventilation** där kall ventilationsluft tas in utan förvärmning bedöms inte ge tillräckligt stabilt termiskt inomhusklimat. Som det framgår i denna rapport möjliggörs FX-ventilation i kombinationen med förvärmning i t.ex tilluftsradiatorer. Paketet **FX-ventilation + Lågtemperatur-tilluftsradiatorer** gav en livscykelkostnad marginellt lägre än dagens lösning. **FTX-ventilation** bedöms vara marginellt dyrare än nuvarande lösning.

Om fjärrvärmen behålls som primär värmekälla och målsättningen är att hålla sig inom kravet för ”ej eluppvärma” byggnader blir det svårt att nå framtida energikravnivåer med enbart

installationsåtgärder, åtgärder så som tilläggsisolering av byggnadsskalet och/eller fönsterbyte krävs troligtvis också. Installation av **FX-ventilation + Lågtemperatur-tilluftsradiatorer,** förbättring av lufttäthet till nybyggnadsstandard och samtidig förbättring av isoleringsgraden till 0,45 W/(m^2K) är emellertid kombinationen som ger störst energibesparing och når föreslagit NNE-kravnivå för renovering på 90 kWh/m^2.

En renoveringsstrategi med lågtemperatursystem och värmepump gör att dagens energikrav lättast nås, utan att åtgärder ens behöver göras på byggnadsskalet. Ju större täckningsgraden på värmepumpen är ju lättare nås kraven, markvärmepumpen kom därför bäst ut här. Fjärrvärmebranschen är fullt medvetna att detta gäller för majoriteten av svenska flerbostadshus och argumenterar för att BBR-kravet för eluppvärmda byggnader borde göras tre gånger hårdare än för ej eluppvärmda byggnader då årsvärmefaktorn för dagens värmepumpar är ungefär 3. Om byggnader inom fjärrvärmenätet utrustas med värmepumpar och solvärme kan det bli svårt att överleva för fjärrvärmeverken, inte bara sänks totala värmebehovet, elanvändningen ökar och det blir större variationer i värmebehovet över året.

Ur hållbarhetssynpunkt uppstår flera viktiga frågeställningar vid renovering av byggnader inom fjärrvärmenätet: Är fjärrvärmen mera miljövänlig än andra värmeproduktionsformer? Behövs fjärrvärmen i framtiden? Om ja, hur kan konvertering till andra uppvärmningsformer inom fjärrvärmenätet stoppas? Bör energikrav ställas på värmebehov istället för energianvändning? I forskarskolan Reesbe kommer dessa frågor utvärderas, se kapitlet om ”Förslag till vidare forskning”.

Som beskrivits i teorin, påverkar lufttätheten ventilationssystemens funktion. Enhetliga tendenser sågs både i Bergätravägen och Hovgården. I nästa kapitel om Hovgården redogörs det mera för dessa mekanismer.

3.2 Hovgården(Borlänge)

Hovgården är beläget en mil söder om Borlänge. Huset är byggt långt före Miljonprogrammet och är därför inte representativt för dessa flerbostadshus (dock för äldre stadsbebyggelse i t.ex. Stockholm med massiva tegelstensväggar). Genom att ta med detta K-märkta hus i förstudien täcktes däremot andra aspekter av renoveringsproblematik utanför fjärrvärmenätet och bevarandekrav.

Figur 16. Hovgården en höstdag

Ytterväggarna i huset består dels av 600 mm tegel med in- och utsida av puts och källare av 750 mm sten med putsad in- och utsida. Alla fönster är 3-glas från 1988 medan byggnadens entrédörrar är äldre med 2-glasfönster. Vindsbjälklaget är isolerat med 500-700 mm lösull. Källargolv och platta på mark är av betong utan isolering. Det genomsnittliga U-värdet, U_m-värdet, beräknades till 0,73 W/(m^{2}K).

Lägenheterna ventileras via separata frånluftsfläktar placerade i spiskåpa och badrum. Fläktarna kan regleras manuellt i två hastigheter, men på grund av dålig lufttäthet i fasaden är fläktarna ofta avstängda. Ventilationsgraden beräknades till 0,20 l/(sm^2) A_{temp}. I tvättstuga och utrymme för bastu i källaren finns även frånluftssystem.

Lufttätheten bestämdes experimentellt till 1,3 l/sm^2 vid 50 Pa trycksättning enligt ISO 9972/EN 13829 (*q50*). Enligt ekvation 6 motsvarar detta en ofrivillig ventilation på 0,15 l/sm^2 A_{temp} eller 0,21 h^{-1} om byggnaden inte skulle vara trycksatt. Under daglig drift medför dock frånluftsystemet att en stor del av infiltrationen blir till kontrollerad ventilation (som beskrivits i teoridelen). Ändå kvarstår 0,10 h^{-1} som ren ofrivillig ventilation, se Figur 17.

Byggnaden värms via två markvärmepumpar från 1999 med spets av oljepanna och traditionella radiatorer. Oljeförbrukningen motsvarar ungefär 20 % av det totala energibehovet för uppvärmning.

På tappvarmvattenanläggningen finns även en ackumulatortank på 500 liter med elpatron för att säkerställa temperaturen och undvika tillväxt av legionellabakterier i tappvarmvattnet. Enligt fastighetsägare används inte elpatronen mer än marginellt. Värmeanläggningen förser även två intilliggande byggnader med värme och tappvarmvatten via kulvertsystem.

I åtgärdspaketen för Hovgården undersöktes följande åtgärder:

Lågtemperatur-tilluftsradiatorer
Tilluftsradiatorer adderades till de traditionella radiatorerna

FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, utbyte
VBX-modul, samt utbyte av hälften av de traditionella radiatorerna till tilluftsradiatorer

FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, komplettering
VBX-modul, tilluftsradiatorer adderades till de traditionella radiatorerna

FTX-ventilation
FTX-system

3.2.1 Indata för beräkning i TMF Energi

Nedan följer en lista över byggnadsfysikaliska data för byggnaden, specifikationer över relevanta installationer (som nya och rena), klimatdata och använder indata till beräkningsprogrammet TMF Energi.

Klimat

- Klimatzon 2
- Genomsnittlig utomhustemp.: 4,2 °C

Byggnad och installationer

- Ventilationsflöde ursprunglig: 0,20 l/sm^2, vilket motsvarar ungefär 0,29 h^{-1}
- Ventilationsflöde efter åtgärd: 0,35 l/sm^2
- Ventilationsflöde vid behovsstyrd ventilation: 0,35 l/sm^2 14 timmar/dygn och 0,10 l/sm^2 10 timmar/dygn
- Lufttäthet ursprunglig: 1,3 l/(s·m^2) omslutande area vid *q50*, vilket med dagens systemlösning ger en ofrivillig ventilation på ungefär 0,10 l/(s·m^2) A_{temp} eller 0,14 h^{-1}
- Lufttäthet efter förbättring: 0,9 l/(s·m^2) respektive 0,5 l/(s·m^2)
- Inomhustemp.: 21 °C
- U_m: 0,73 W/m^{2}K
- Tappvarmvatten per person och år (60 °C): 14 m^3 vilket tillsvarar 25 kWh/m^2 A_{temp}
- Gränstemperatur: 16,4 °C
- Måttlig avskärmning från vind
- Markvärmepump: Verkningsgrad (COP) 0/45 °C = 3,5, 0/35 °C = 4,5
- Framledningstemperatur vid **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, utbyte** och DVUT: 53 °C med *q50*=1,3 l/(sm^2), 52 °C med *q50*=0,9 l/(sm^2) och 51 °C med *q50*=0,5 l/(sm^2)

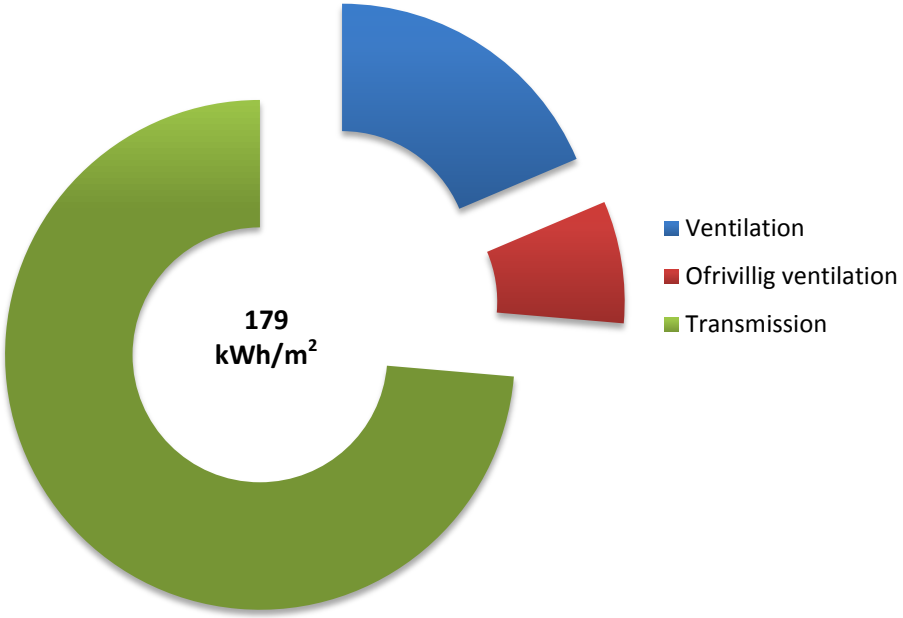
- Framledningstemperatur vid **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, komplettering** och DVUT: 46 °C med *q50*=1,3 l/(sm^2), 44 °C med *q50*=0,9 l/(sm^2) och 42 °C med *q50*=0,5 l/(sm^2)

LCC-analys

- Livslängd alla installationer: 15 år
- Realkalkylrenta per år: 5 %
- Energiprisökning real, per år: 2 %
- Pris el: 1 kr/kWh
- Pris olja: 1,5 kr/kWh
- Investeringskostnader för åtgärder redovisas med blå staplar i figur 20.

3.2.2 Resultat

Det totala energibehovet för uppvärmning beräknades till 179 kWh/m^2 exkluderat tappvatten, se Figur 17. Detta motsvarar en specifik energianvändning på 204 kWh/m^2. Transmissionsförlusterna är klart dominerande. Det är också värt att notera att den ofrivilliga ventilationen är förhållandevis stor.



Figur 17. Energibehov för uppvärmning av Hovgården (tappvatten exkluderat). Specifika värmeeffektförluster per A_{temp}: Q_v/A_{temp}=0,24 W/(m^{2}K), Q_{ov}/A_{temp}=0,10 W/(m^{2}K) och Q_t/A_{temp}=1,17 W/(m^{2}K).

Enligt förbrukningsdata ligger den verkliga köpta energin på ungefär 80 kWh/m^2 per år för värmeproduktion med värmepumparna och oljepannan som finns i byggnaden, fastighetsel och tappvarmvatten inkluderat.

Den orange markören, ”Dagens systemlösning”, på 79 kWh/m^2 längst till vänster i Figur 18 representerar en motsvarande beräkning gjord med TMF Energi på dagens byggnad, en kontrollerad ventilation på 0,20 l/sm^2 och dagens täthetsgrad. Alla övriga fall i diagrammet har en kontrollerad ventilation uppjusterat till BBR kravet på 0,35 l/sm^2. Markörerna i mitten och till höger grundas på att

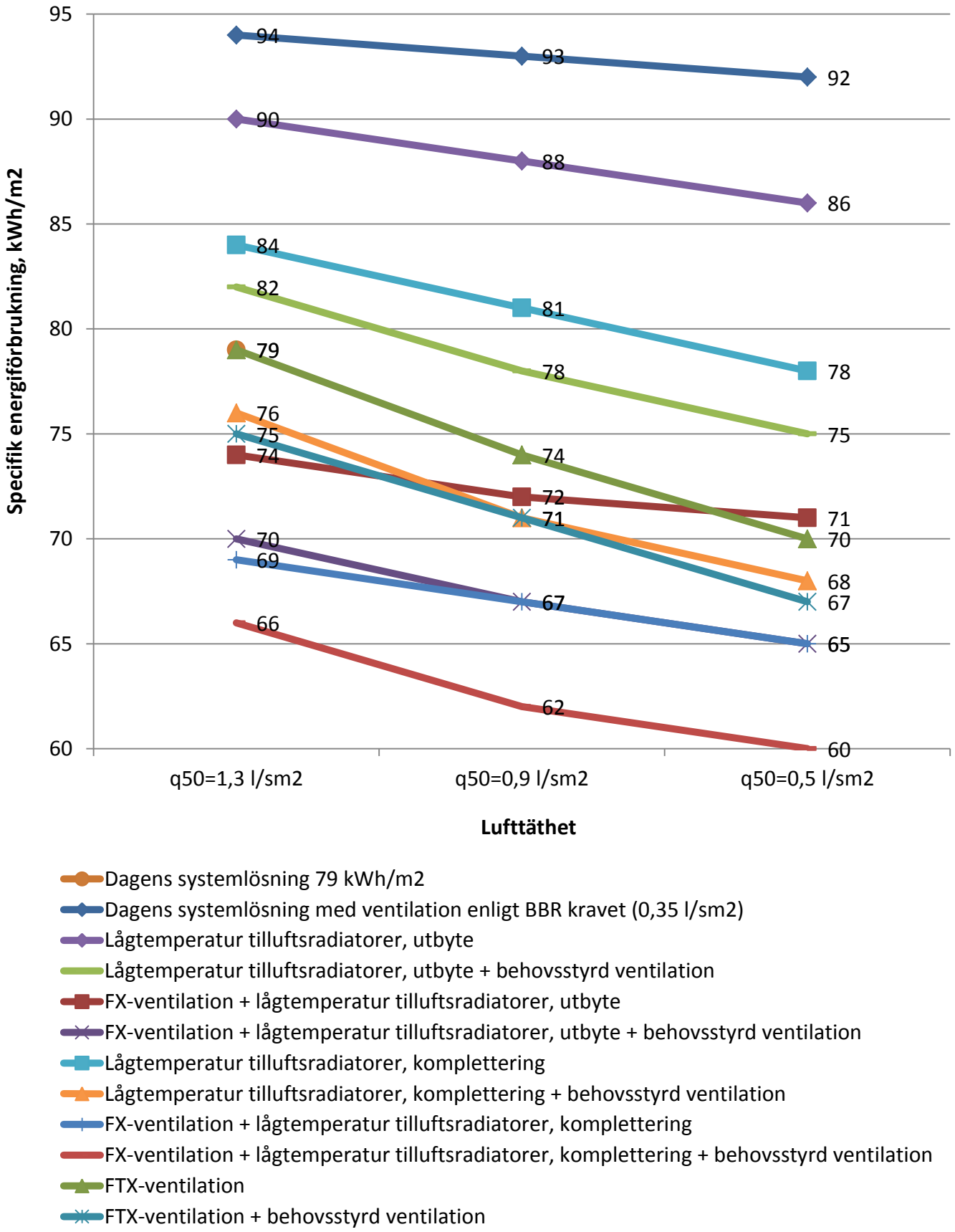
lufttäthet förbättras till q50=0,9 l/(sm^2) respektive q50=0,5 l/(sm^2). Kravnivån på specifik energianvändning för nya bostäder med elvärme är 75 kWh/(m^2·år) i den aktuella klimatzonen, förväntad NNE-kravnivå vid renovering från 2021 är 55 kWh/(m^2·år).

Figur 19 representerar fall där byggnadsskalets isoleringsgrad har förbättrats till 0,50 W/(m^{2}K). Förbättringen motsvarar att ett värmemotstånd, R, på 0,64 (m^{2}K)/W läggs till absolut hela byggnadsskalet. Det är som om hela byggnaden inklusive tak, golv och fönster skulle bli inklätt med 20-30 mm mineralull.

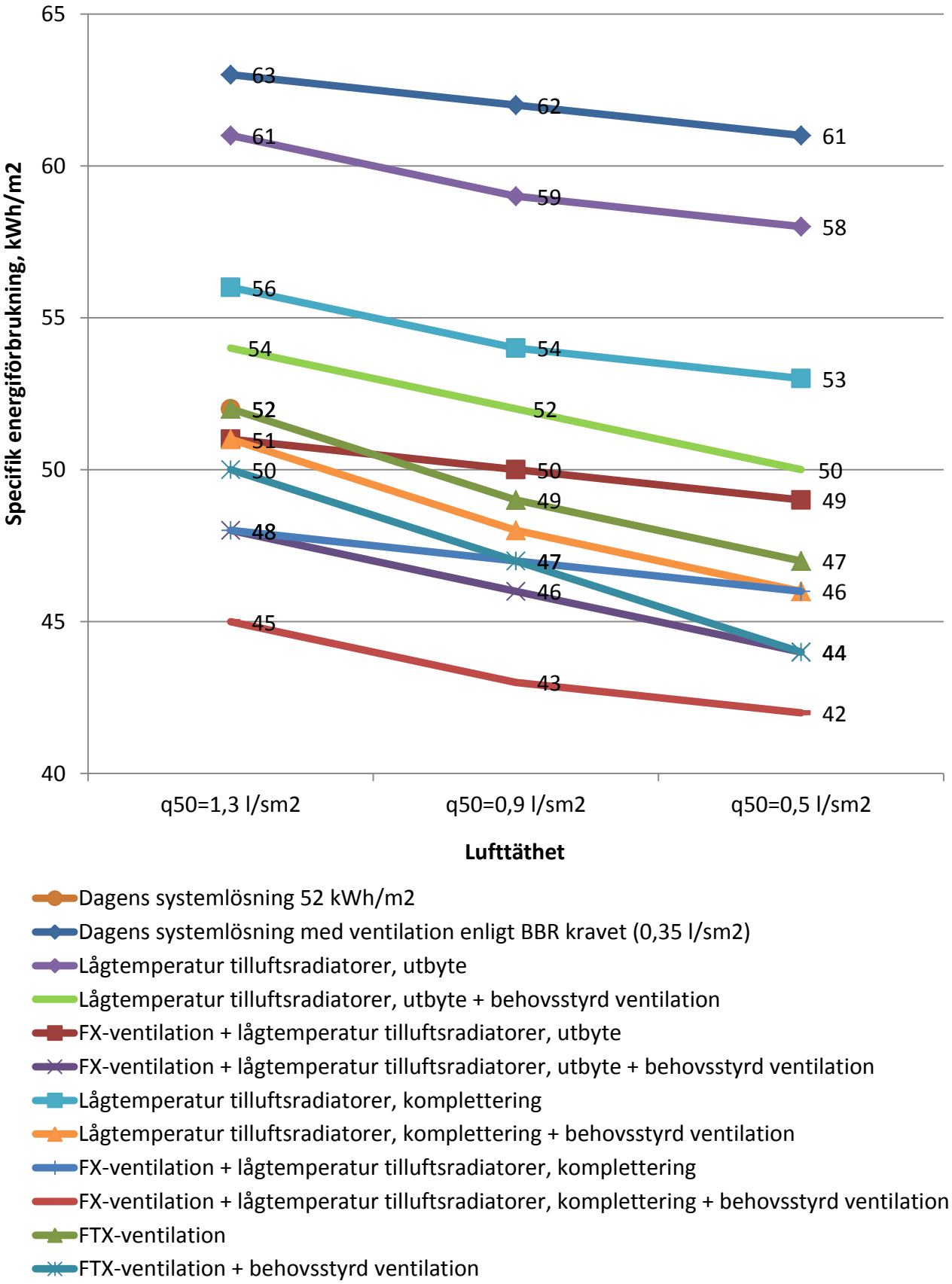
Med hjälp av beräkningsprogrammet TMF Energi, som baseras på ekvation 6, har andelen ofrivillig ventilation med ursprungssystemet och systemen **med FX-ventilation+ lågtemperatur-tilluftsradiatorer** och **FTX-ventilation beräknats,** se Tabell 3. Notera att programmet inte kalkylerar med att **FTX-ventilation** skapar något undertryck i bygganden. Enligt framställaren av TMF Energi ger programmet ändå noggrant resultat med FTX-ventilation [20].

Tabell 3. Ofrivillig ventilation med olika lufttäthetsgrader i Hovgården.

System	**q50=1,3 l/sm^2**	**q50=0,9 l/sm^2**	**q50=0,5 l/sm^2**
Dagens systemlösning	0,14 h^{-1}	0,07 h^{-1}	0,02 h^{-1}
FX-ventilation+ lågtemperatur-tilluftsradiatorer	0,14 h^{-1}	0,07 h^{-1}	0,02 h^{-1}
FTX-ventilation	0,21 h^{-1}	0,15 h^{-1}	0,08 h^{-1}



Figur 18. Specifik energianvändning med olika renoveringsåtgärder.

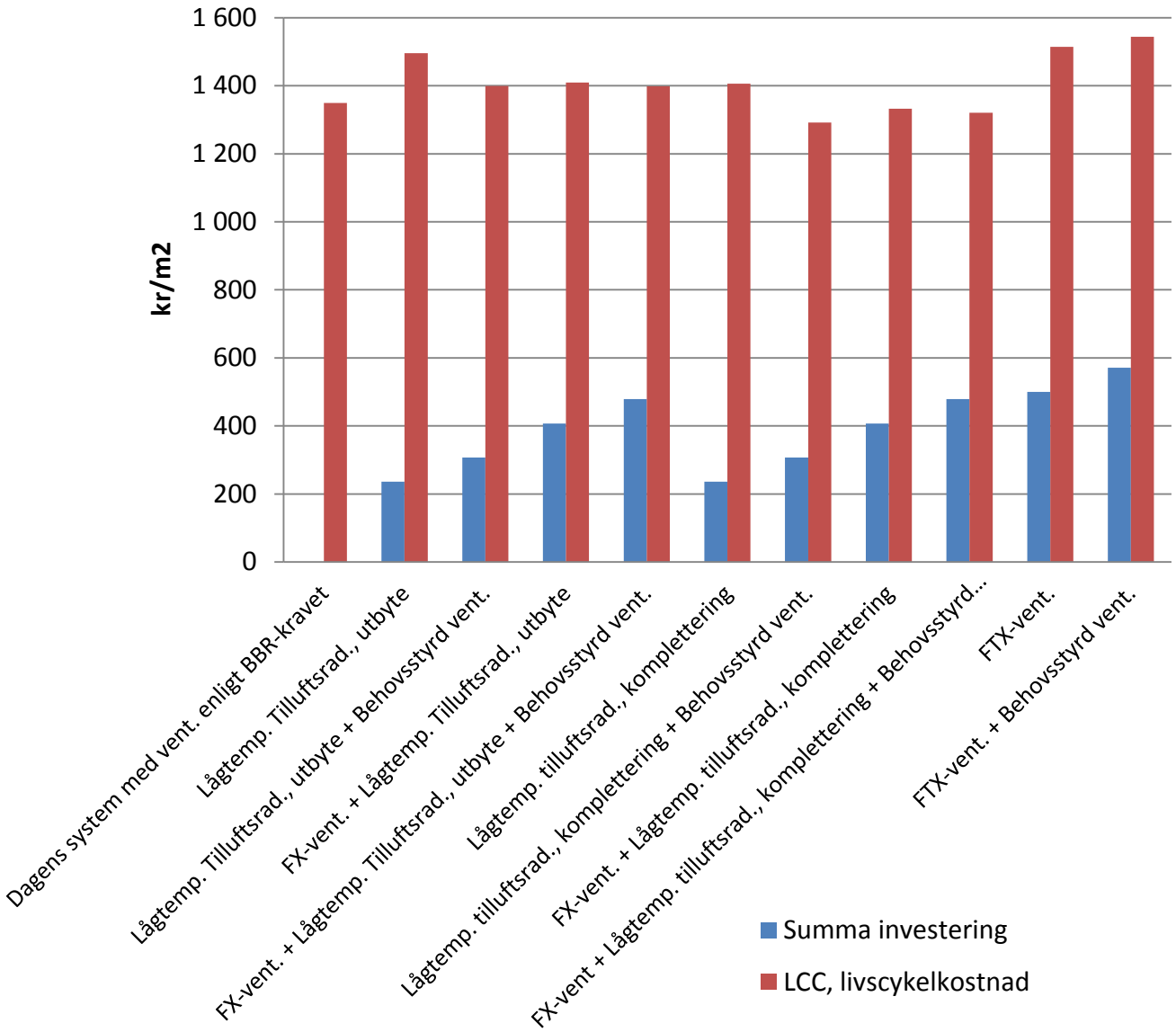


Figur 19. Specifik energianvändning med olika renoveringsåtgärder. I detta diagram har byggnadsskalets isoleringsgrad förbättrats till U_m=0,50 W/(m^{2}K).

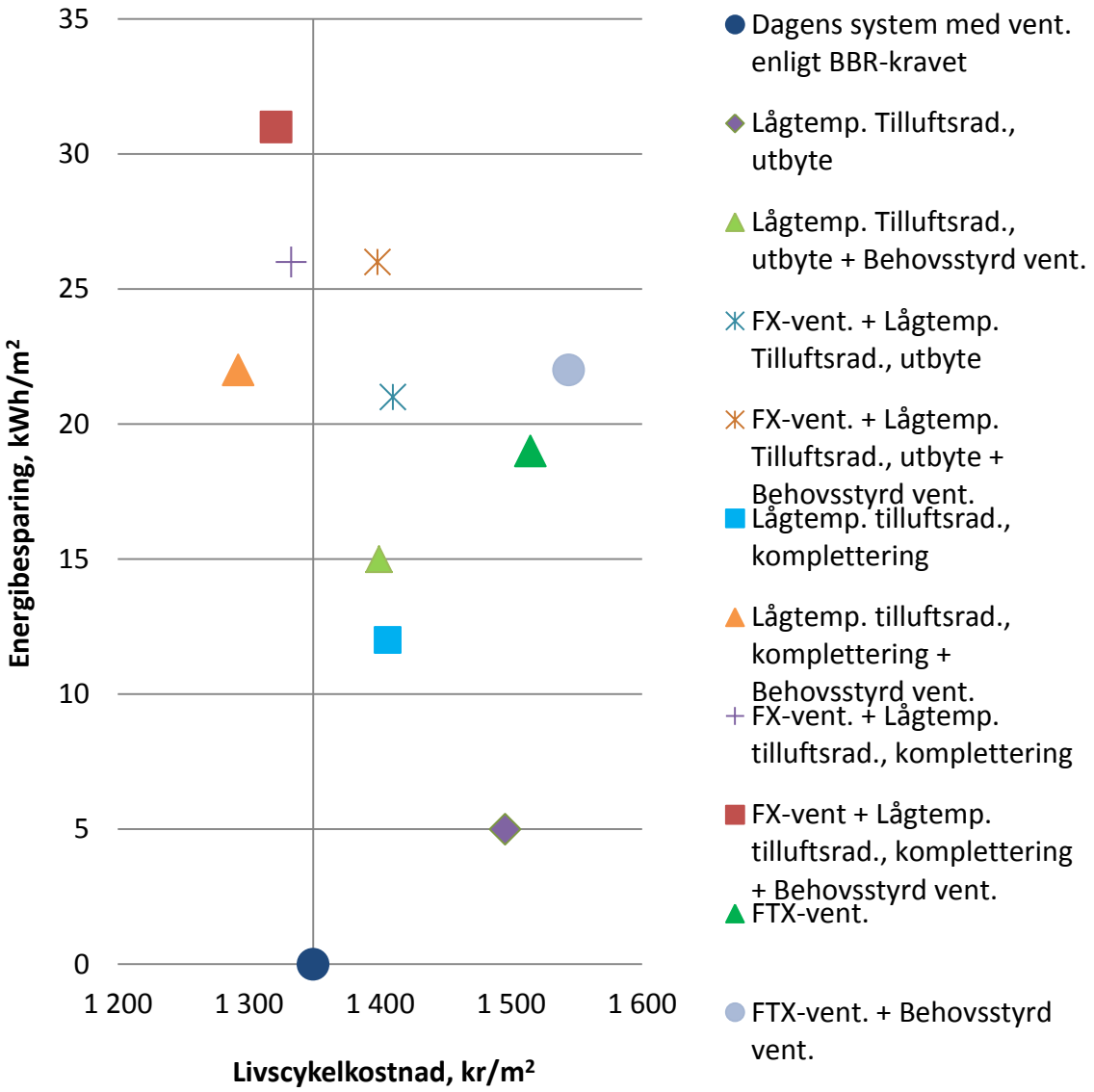
3.1.3 Kostnadsanalys

Kostnadsanalyserna baserades på Hovgården i existerande skick med dagens systemlösningar med befintliga frånluftskanaler och markvärmepumpar men med ventilationsgrad enligt BBR-kravet och förbättrad lufttäthet till 0,9 l/sm^2 vid q50. Investeringskostnader för de olika åtgärdspaketen med tillhörande livscykelkostnad (LCC) är presenterat i figur 20 (engångskostnader). Med livscykelkostnaden menas här den totala kostanden som krävs med respektive åtgärdspaket i 15 år räknat med dagens penningvärde, investeringskostnader och ackumulerade kostnader för köpt energi har alltså summerats.

Figur 21 klargör sambandet mellan energibesparing och livscykelkostnad för varje enskild åtgärdspaket. Dagens systemlösning gav livscykelkostnaden 1349 kr/m^2 och år. Åtgärdspaketen till vänster om dagens systemlösning ger lägre livscykelkostnad per år. Ju högre upp i diagrammet ju större besparing ger åtgärdspaketet.



Figur 20. Investeringskostnader (blått) och livscykelkostnad (rött) för olika åtgärdspaket.



Figur 21. Samband mellan energibesparing och livscykelkostnad för varje undersökt åtgärdspaket i Hovgården. Besparing till halverad energianvändning kräver energibesparing på minst 46 kWh/m^2 (över skalan i figuren).

3.2.4 Diskussion

Hovgården, så som byggnaden är i dag, har en specifik energianvändning på ungefär 80 kWh/m^2 (köpt energi), trots dåligt U_m-värde, otät fasad och avsaknad av energiåtervinning av ventilationsluft. Energianvändningen täcks för det mesta av el, medan en liten del är olja. Nybyggnadskravet för eluppvärmda bostäder i Dalarna är 75 kWh/m^2 (klimatzon 2). Att den specifika energianvändningen blir så pass bra är tack vare värmepumpar med årsverkningsgrad (SPF) runt 3,0. Utan värmepump skulle energianvändningen hamna runt 200 kWh/ m^2.

Byggnaden har relativt små ventilationsförluster och liten elförbrukning i ventilationssystemet. Totalt sett ventileras byggnaden med ungefär 0,43 h^{-1} om både kontrollerad och okontrollerad ventilation

läggs ihop. Då byggnaden ventileras såpass litet blir dagens systemlösning svårslaget kostnadsmässigt med åtgärdspaketen som undersöktes.

En ökning av delen som i dag är kontrollerad ventilation från 0,20 l/sm^2, vilket motsvarar ungefär 0,29 h^{-1}, till BBR-kravnivå på 0,35 l/sm^2 skulle ge en ökning av energiförbrukningen på 19 % till 94 kWh/m^2. Ökningen blir stor då värmepumparnas täckningsgrad redan är nådd och den extra energianvändningen måste täckas av olja eller elpatron. En viktig observation i studien är att den extra energianvändning som krävs för att täcka ofrivilliga ventilationsförluster framstår som väldigt onödig om Hovgården som den är i dag ska ventileras enligt BBR-kravet. Livscykelkostnaden ökar med över 200 kr/m^2. Däremot är ventilation enligt kravnivå att rekommendera av hälsoskäl.

Förbättrad lufttäthet skulle inte göra någon större skillnad på energiförbrukningen med dagens systemlösning, se blåa kurvan längst uppe i Figur 16 som bara sänks med 2 kWh/m^2. Emellertid påverkar lufttätheten prestanda och komfort med renoveringspaketen som undersöktes.

Det kan observeras att med den befintliga täthetsgraden ger åtgärden **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, utbyte** en besparing på 5 kWh/m^2 medan åtgärd (**b) FTX-ventilation** inte ger någon besparing alls. En uppjustering av den kontrollerade ventilationen till 0,35 l/s m^2 A_{temp} är inbakad i alla dessa åtgärder.

Att installera FTX-system i byggnaden som den är i dag är problematisk. Som beskrivits i teoridelen kommer de stora otätheterna göra att andelen ofrivillig ventilation förblir stor, något som missgynnar FTX-system mer än FX-system. Värmepumparna är dessutom så effektiva att det blir lika energieffektivt att producera energi med dessa som att driva extra fläktar i ett FTX-system för att återvinna energi. Kostnadsmässigt är installation av båda undersökta FTX-systemen olönsamma i denna värmepumpsvärmda byggnad, se Figur 20 och 21.

För systemen med tilluftsradiatorer innebär dålig lufttäthet andra nackdelar. Med q50=0,9 l/sm^2 vill ett undertryck på knappt 5 Pa vara tillräckligt för att ventilera enligt BBR kravet, se Figur 8 och 9. Bara hälften av det inkommande ventilationsflödet går då genom tilluftsradiatorerna, något som sänker den möjliga värmeeffektavgivningen från varje radiatorenhet med upp till ca 100 W.

I Hovgården läcker det framförallt kring fönstren. Lufttätheten skulle troligtvis lätt kunna förbättras till 0,9 l/sm^2 om drevning/tätning gjordes runt fönster. Denna förbättring skulle göra att energianvändningen med **FTX-ventilation** sänktes med ungefär 5 kWh/m^2 A_{temp}, medan **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, utbyte** bara skulle få en mindre sänkning.

Förbättras lufttätheten ännu mera, till vanlig standard i dagens byggande, blir **FTX-ventilation** och **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, utbyte** lika effektivt, runt 70 kWh/m^2 A_{temp}. Det är uppenbart att god lufttäthet är viktigast för FTX-systemet. Metoder för fönsterrenovering och tätning kring fönster utreds på Högskolan Dalarna i examensarbete.

Både att byta ut ett antal traditionella radiatorer mot tilluftsradiatorer och lägga till tilluftsradiatorer undersöktes teoretiskt. Som beskrivits i teoridelen avgör ventilationsflödet hur många tilluftsradiatorer som kan installeras i en bostad. För en typisk lägenhet byts hälften av de traditionella radiatorerna ut mot tilluftsradiatorer. Tilluftsradiatorer är effektivare än traditionella radiatorer av samma storlek och bytet kan därmed göra att framledningstemperaturen kan sänkas. Har byggnaden stor specifik energiförlust och stora otätheter så som Hovgården kommer dock inte byte till tilluftsradiatorer att möjliggöra mycket lägre framledningstemperatur. I detta fall kunde

framledningstemperaturen bara sänkas med 2-4 °C i, den största sänkningen kunde göras om lufttätheten samtidigt förbättrades.

För att kunna skapa ett väl fungerande lågtemperatursystem kan det alternativt vara lämpligt att installera tilluftsradiatorer som komplement till befintliga radiatorer och ha så öppna radiatorventiler som möjligt. Lägenheternas utformning avgör naturligtvis om detta är möjligt. I Hovgården som i många andra byggnader fanns det inga lämpliga platser för att lägga till tilluftsradiatorer, åtgärdspaket där tilluftsradiatorer lades till togs ändå med i förstudien för att belysa vilken effekt sänkt framledningstemperatur skulle ha på värmepumparna. I detta fall får cirkulationspumpen i radiatorkretsen jobba lite hårdare.

Åtgärdspaket där tilluftsradiatorer läggs till befintliga radiatorer innebär att framledningstemperaturen i radiatorsystemet kan sänkas med 7-8°C jämfört med paketet där tilluftsradiatorer ersätter traditionella radiatorer, vilket förbättrar värmepumparnas verkningsgrad och resulterar i en besparing på 4-6 kWh/m^2. Alla åtgärdspaket med komplettering med tilluftsradiatorer är speciellt lönsamma ekonomiskt, se Figur 21.

Om behovsstyrning av ventilationen läggs till på respektive åtgärd fås ytterligare besparing på 3-5 kWh/m^2 A_{temp}. En slutsats som kan dras är att **Behovsstyrd ventilation** var den enskilt kostnadseffektivaste åtgärden av alla och möjliggör något större energivinst i FX-systemen än i FTX-systemen (Figur 21).

Åtgärdspaketet som bedömdes vara mest ekonomisk av alla var **Lågtemperatur-tilluftsradiatorer, komplettering+ behovsstyrd ventilation.** Alltså en enkel lösning utan värmeåtervinning men som hjälper till att skapa bättre termisk komfort. Paketet skulle kunna ge en kostnadsbesparing på 57 kr/m^2 över 15 år vilket är så pass stort att investeringen är återbetald på ungefär 6 år.

Installation av såväl FX-system som FTX-system kräver omfattande arbete i Hovgården, troligtvis något mindre för FX-system då tilluftskanaler inte behövs och befintliga kanaler kan utnyttjas. Åtgärdskombinationen som beräknades ge störst energisänkning var **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer, komplettering + behovsstyrd ventilation** och samtidig förbättring av lufttätheten. Lösningen skulle ge en specifik energianvändning på 60-62 kWh/m^2, vilket motsvarar en sänkning med ungefär 25 % från ursprungsnivå. Sänkningen skulle inte vara tillräckligt stor för att nå förväntad NNE-nivå för renovering, någon ytterligare åtgärd som till exempel solvärmesystem behövs för att klara denna kravnivå. Lösningen ger en livscykelkostnad knappt lägre än dagens systemlösning.

Tilläggsisolering av byggnadsskalet skulle troligtvis bli både omfattande och svårgenomförbar för denna K-märkta byggnad. Figur 17 redovisar ändå tänkta fall där U_m-värdet har förbättrats till 0,50 W/m^{2}K.

Det är ytterväggarna som är den huvudsakliga orsaken till högt U-värde. För att förbättra standarden och nå U_m=0,50 W/m^{2}K krävs inte mycket isolering. Som Figur 19 visar skulle förbättrad isoleringsgrad ge stort utslag på energianvändningen, överslagsvis en sänkning på 20-25 kWh/m^2. Utbyte av t.ex fönster skulle inte räcka för att nå samma nivå.

Om målet med renovering är att nå föreslaget NNE-krav för renovering är isolering av ytterväggarna troligtvis nödvändigt. Väggisolering tillsammans med undersökta renoveringsåtgärder samt moderna värmepumpar skulle kunna sänka den specifika energianvändningen för Hovgården till någonstans mellan 40 och 50 kWh/m^2. Om tilläggsisolering först görs är det troligtvis lönsamt att isolera till ännu lägre U_m-nivå. Om tilläggsisoleringen läggs på utsidan av ytterväggarna säkerställs dessutom att

byggnaden behåller stor termisk massa mot inomhusklimatet vilket ger ett stabilt inomhusklimat där temperatursvängningar undviks.

Ventilationen som den är i dag når inte upp till kravnivån, men enligt statistik är det likadant för genomsnittet av svenska bostadshus [23]. Hur mycket ventilationen påverkar inomhusklimatet debatteras. Ett skäl för att byta till någon av de föreslagna systemlösningarna skulle även kunna vara att säkerställa bättre termisk komfort och bättre inomhusluft. I dag kommer luften in ouppvärmd och som en konsekvens tenderar hyresgäster att dämpa frånluftsfläkten vintertid.

Med **FTX-ventilation** fås sällan eller aldrig dragproblem. Systemlösningar med **lågtemperatur-tilluftsradiatorer** kan i vissa fall ge upphov till dragproblem i väldigt välisolerade byggnader (beskrivet i teoridelen). I fallet Hovgården skulle emellertid tilluftsradiatorerna värma luften till acceptabel nivå, en del av ventilationsluften kommer dock fortfarande komma in ouppvärmd genom springor i byggnadsskalet.

I Hovgården används en del olja som spets på vintern när det är som kallast. Installation av VBX-modul kommer troligtvis leda till att värmepumparnas årsverkningsgrad blir något bättre utan att täckningsgraden förbättras nämnvärt. Vill man kapa oljeförbrukningen och återvinna energi i frånluften är en frånluftsvärmepump troligtvis ett bra alternativ till VBX-modul då denna tillför en extra kompressor. Denna lösning undersöktes inte.

4 Slutsatser

- Återvinning av värme i frånluften kommer att vara en betydelsefull aspekt vid framtida renoveringar av befintliga flerbostadshus. Denna förstudie visar att **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer** kan vara ett väl så bra alternativ som **FTX-ventilation** för att nå framtida NNE-krav vid renovering. För båda undersökta objekten kunde energianvändningen sänkas med upp till 33 % med lösningar med lågtemperatur-tilluftsradiatorer och värmeåtervinning i frånluften. För att nå NNE-kravnivå krävs det dock troligtvis samtida förbättringar av täthet och isoleringsgrad i byggnadsskalet för merparten av äldre flerbostadshus

- Utvärderade system med **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer** gav lägre livscykelkostnad än **FTX-system**

- Energikraven i dagens BBR nås enklast med värmepumpar. Moderna mark- eller bergvärmepumpar kan lösa energikraven även för ”dåliga” byggnader där klimatskärmen inte har förbättrats. Frånluftsvärmepumpar kan dock inte täcka hela energibehovet i ”dåliga” byggnader då frånluften är en begränsad värmekälla och behöver kompletteras med annan värmeproduktion

- Energibesparing och kostnadsbesparing med lågtemperatur-tilluftsradiatorer blir mera påtaglig för fastighetsägare i kombination med värmepumpar än med fjärrvärme. Värmepumpar får bättre COP medan lågtemperatursystem i fjärrvärmenät i första hand gynnar fjärrvärmeleverantören. Alla fjärrvärmeleverantörer bör premiera lågtemperatursystem!

- Mera nyanserade energikrav krävs om konvertering från fjärrvärme till värmepumpar ska motverkas; exempelvis genom ökad hänsyn till primärenergianvändning och klimathänsyn eller genom att göra större skillnad på energibärare

- Det finns troligtvis stor outnyttjad potential för lågtemperatursystem påkopplat returledningar i fjärrvärmenät. Frågan bör utvärderas!

- Det finns troligtvis ett samband mellan lufttäthet mätt vid tryckprovning och husets vindavskärmning och storleken på den ofrivilliga ventilationen vid operativt undertryck. En byggnads lufttäthet påverkar hur väl ventilationssystemet fungerar. Stora otätheter drabbar generellt FTX-system mer än FX-system. Vid renovering av äldre hus är det speciellt viktigt att uppskatta lufttätheten för att kunna välja rätt ventilationssystem. Där bör det finnas riktlinjer eller krav på lufttäthet! Förslag till kravnivåer vid *q50*: 0,6 l/(s·m^2) omslutande area för **FTX-ventilation**, 0,9 l/(s·m^2) omslutande area för **FX-ventilation + lågtemperatur-tilluftsradiatorer**

- Utbyte av traditionella radiatorer mot tilluftsradiatorer eller komplettering med tilluftsradiatorer gör att framledningstemperaturen i radiatorkretsen kan sänkas. En temperatursänkning av framledningstemperaturen möjliggör besparingar i produktion och distribution av sekundärvatten. Hur stor sänkning som kan göras beror på byggnadens specifika energiförlust och lufttäthet. En viktig slutsats i förstudien är att det kan vara svårt att skapa lågtemperatursystem i äldre otäta flerbostadshus med stora värmeförluster. Lågtemperatursystem med tilluftsradiatorer kräver förbättrad lufttäthet och isoleringsgrad i byggnadsskalet. I ”sämre” byggnader kan det krävas att tilluftsradiatorer läggs till befintliga radiatorer för att kunna skapa lågtemperatursystem. Gamla radiatorer kan behållas med fördel då dessa har bra värmeavgivande förmåga

- Då lågtemperatursystem är svåra att skapa i äldre flerbostadshus ger tilluftsradiatorer inte nödvändigtvis så stor besparing i sig, men möjliggör FX-lösningar med god termisk och hygienisk komfort med kostnadseffektivitet

- Ett flerbostadshus befintliga system (kanaler, VP etc) bör utnyttjas för att göra renovering ekonomiskt lönsam och skonsam

- Vi slösar inte med tappvatten, varför ska vi göra det med ventilationsluft? Ett enkelt och kostnadseffektivt sätt att spara energi är att behovs styra ventilationen med timer eller sensorer. **Behovsstyrd ventilation** bedömdes till den enskilt kostnadseffektivaste åtgärden för objektet Hovgården

- För Bergsätravägen i Grycksvbo bedömdes **Solvärme** vara den kostnadseffektivaste åtgärden

- Kompletterar man berg- eller markvärmepumpen med en VBX-modul förbättras verkningsgraden men inte täckningsgraden. Kompletterar man istället med en frånluftsvärmepump förbättras inte verkningsgraden, däremot täckningsgraden

- Tryckprovning av flerbostadshus är svårt att göra. En välbeprövad metod (standardiserat) för täthetsprovning av flerbostadshus bör tas fram där termografering ingår!

Förstudien har lett till

Ex-jobb vid Högskolan Dalarna under 2013

- *D. Berge Hedkvist, F. Larsson*, Alternativa ventilationslösningar för 1950-talshus
- *J. Selo, B. Tayfur*, Optimal systemlösning för befintligt flerbostadshus, Hovgården - Borlänge
- *M. Ydron*, Teoretisk beräkning huruvida FTX-system eller FVP-system med tilluftsradiatorer är bäst lämpad i ett äldre flerbostadshus - Hur stor inverkan har lufttäthet på ventilationssystemens prestanda?
- *P. Loré*, Energi- och ventilationsanalys av en 70-talsvilla - En fallstudie med fokus på både termisk komfort och energianvändning
- *N. Nybro,* Fönsterrenovering på Hovgården
- *M. Frid,* Solcellsdrivet FTX-system för miljonprogramshus
- *G. Back och V. Persson*, Teknisk/ekonomisk potential för-energibesparing i 40-tals hus

Doktorandprojekt 2013/18 i forskarskolan REESBE i samarbete med Falun Energi och Vatten

”Doktorandprojektet är en teknisk, ekonomisk och miljömässig studie av hur befintliga flerbostadshus kostnadseffektivt kan renoveras och energieffektiviseras för att docka in i lokala och globala energisystem med utnyttjande av lågtemperatur i kombination med fjärrvärme. Målsättningen är att demonstrera att den totala primärenergianvändningen för att bo och leva i denna "framtidens" bostad blir nära noll då hela energikedjan från produktion och distribution till användning av värme och el beaktas. Studien skall därför ske ur ett systemperspektiv för såväl fastighetsägaren som energileverantör med fokus på primärenergianvändning i boendet”.

I första del av doktorandprojektet är målsättningen att kartlägga typisk primärenergianvändning för några av renoveringspaketen som är föreslagna i denna förstudie.

Företagsforskarskolan REESBE (resurseffektiva energisystem för bebyggelse) drivs av Högskolan i Gävle i samarbete med Mälardalens högskola och Högskolan Dalarna. REESBE är en satsning som sker i nära samverkan med företag i de tre regionerna Gävleborg, Dalarna och Mälardalen och finansieras av Stiftelsen för kunskaps- och kompetensutveckling (KKS). En industridoktorand är rekryterad till Falu Energi.

Referenser

[1] Boverket: Boverkets Byggregler, BBR XX, BFS XXXX:XX

[2] C. Harrysson, Örebro University, The Institution for Building Technique, privat samtal

[3] SABO-utredning, Energianvändning i nybyggda flerbostadshus, 2006

[4] Heating in multi-family dwellings and commercial buildings (in Swedish), Rapport I 2009:4, Svensk Fjärrvärme AB, ISBN 978-91-7381-019-7

[5] Energieffektivisering av flerbostadsfastigheter - Elva lokala exempel år 2012, Länsstyrelsen Gävleborg, Rapport 2012:16

[6] CIT Energy Management, EFFSYS: Konsekvensanalys av NNE-krav för befintliga flerbostadshus, Göteborg, oktober 2011

[7] Energieffektiva lågtemperatursystem, Energimyndigheten (STEM), Projektnummer:30326-1

[8] K. Mjörnell m.fl, Milparena - Renovering av äldre bostadsområden med fokus på energieffektivisering, SP Report 2011:39

[9] Energieffektivisering vid renovering av rekordårens flerbostadshus
Lunds Universitet, Rapport nummer EBD-R—08/22, ISBN-978-91-85147-32-8

[10] J. A. Myhren, Potential of Ventilation Radiators, KTH, ISBN 978-91-7415-940-0

[11] Juusela , ed., Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort- Guidebook to IEA ECBCS, Annex 37 Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings, *VTT Technical Research Centre of Finland, 2003, ISBN 951-38-*

[12] ENERGIEFFEKTIVISERING AV SVERIGES FLERBOSTADSHUS - Hinder och möjligheter att nå en halverad energianvändning till 2050, Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA), 2012, ISBN: 978-91-7082-845-4

[13] TMF Energi version 2.1 (in Swedish), Trä- och Möbelföretagen (TMF), 2010

[14] Indata for energy calculations in offices and houses (in Swedish), Boverket 2007, ISBN 978-91-85751-65-5

[15] Purmo Simulator, Purmo OY, version 05.11.2007

[16] Uppdrag 13: Nationell strategi för lågenergi byggnader, Energimyndigheten, ER 2010:39

[17] www.energimyndigheten.se

[18] www.acticon.se

[19] P. Fahlén, Bergvärmepump med borrhålsåterladdning, SP Rapport

[20] www.IVT.se

[21] FEBY 12: Kravspecifikation för nollenergihus, passivhus och miniergerihusIVL, RapportB 2027, 2012

[22] Energi i bebyggelsen – tekniska egenskaper och beräkningar– resultat från projektet BETSI, Boverket 2010, ISBN tryck: 978-91-86559-83-0

[23] P. Wahlgren, Goda exempel på lufttäta konstruktionslösningar, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2010, ISBN 978-91-86319-45-8

[24] www.energyconservatory.com

[25] Så mår våra hus: Redovisning av regeringsuppdrag beträffande byggnaders tekniska utformning m.m., Boverket, 2009, ISBN: 978-91-86342-28-9

LÅGAN (program för byggnader med mycket LÅG energiANvändning) är ett samarbete mellan Energimyndigheten, Boverket, Sveriges Byggindustrier, Västa Götalandsregionen, Formas, byggherrar, entreprenörer och konsulter med syfte att öka byggtakten av lågenergibyggnader.

www.laganbygg.se

LÅGAN - FÖR ENERGIEFFEKTIVA BYGGNADER