

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>Konvertering av befintliga flerbostadshus, effektiv uppvärmning med lågtemperatur-konvektorsystem</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Conversion of existing multi-dwelling buildings, efficient heating with low-temperature convector systems</b>	
Universitet/högskola/företag <b>RISE</b>	Avdelning/institution <b>Värme- och kylteknik</b>
Adress Box 857, 501 15 Borås	
Namn på projektledare <b>Martin Larsson</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Pia Tiljander, Caroline Markusson</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>Lågtemperatur, frikyla, energirenovering flerbostadshus, exergi, seriekopplade värmare</b>	

## Förord

Denna förstudie har beviljats forskningsmedel av energimyndigheten, via utlysningen Termo. Medverkande intressenter har bidragit med sin tid och prototyper. Electricity, som är ett medborgarinitiativ bestående av ca 50 bostadsrättsföreningar i Hammarby Sjöstad, har aktivt medverkat med dialog och aspekter ur BRFs perspektiv. Acticon, som är ett tillverkande företag med ventilationsprodukter, har bidragit med kunskap, dialog och tillverkning av prototyp. Innoheat, som är ett tillverkande företag med luft-vatten-värmväxlare, har bidragit med kunskap, dialog, dimensionering och tillverkning av prototyp. RISE utförde mätningar i laboratorium samt utförde själva analysen och forskningen.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	2
Summary .....	3
Inledning .....	5
Bakgrund.....	6
Syfte och mål .....	7
Genomförande .....	9
Indata och beräkningar.....	11
Resultat .....	13
Rumsvärmare VVX1 i prototyp.....	14
Tilluftvärmare VVX2 i prototyp.....	18
Seriekoppling av VVX1 och VVX2 i prototyp .....	18
Prestanda i kyldrift, med frikyla .....	22
Potential på systemnivå.....	24
Energibesparing värmedrift, värmepumpar .....	26
Kostnadsbesparing och pay-off värmedrift, värmepumpar .....	28
Seriekopplade värmepumpar .....	29
Fjärrvärme.....	31
Lågt flöde och stabil reglering .....	31
Diskussion.....	32
Referenser, källor.....	34
Bilagor .....	34

## Sammanfattning

Uppvärmning av befintliga flerbostadshus står för en stor andel av Sveriges och EUs energianvändning. Med dagens energipris är det svårt att energirenovera befintliga bostäder i Sverige med mekanisk frånluftsventilation, F-ventilation och erhålla en pay-off tid som är acceptabel för beslutsfattare. För att sänka tröskeln för att genomföra energirenoveringar på det befintliga flerbostadshusbeståndet, har denna förstudie undersökt möjligheten till att uppnå systemfördelar genom att befintliga radiatorer byts mot lågtemperaturkonvektorer och som innebär ett relativt litet ingrepp och låg investering. Mätningar på en prototyp av seriekopplad lågtemperaturkonvektor visade att betydande energioptimering kan uppnås oavsett om fjärrvärme eller bergvärmepumpar betjänar fastigheten. Gynnsammare systemtemperaturer kan ge ca 70% minskad eleffekt, och 30% minskad elanvändning för värmepumpar, beroende på förutsättningar. Fjärrvärmens vinster uppnås mer på infrastrukturnivå, främst med ökad kondensvärmeåtervinning i kraftvärmeverken.

Resultatet som uppmättes var att dimensionerande framledningstemperatur till fastigheternas värmesystem kan minskas med ca 20 K, till 35°C jämfört med konventionella 55°C. Returtemperaturen kan minskas ännu mer, med ca 25 K. Ett av de viktigaste resultaten är att det är möjligt att uppnå en returtemperatur på värmebäraren från lågtemperaturkonvektor-prototypen, som är lägre än rumstemperaturen. En faktor som möjliggjort prototypens prestanda är en ny

typ (patenterade) av högeffektiva värmeväxlare i kombination med påtvingad konvektion.

Sänkt systemtemperatur möjliggör nyttjande av lågvärdiga värmekällor, vilket utgör en potential både för termiska nät och värmepumpar. Lågkonvektorkonceptet lämpar sig väl för ”Femte generationens termiska nät” (5GDHC), med låg temperatur på värmekällan och stora temperaturdifferenser. Med seriekopplade värmepumpar i 5GDHC uppnås hög verkningsgrad med föreslaget koncept, energirenoveringen möjliggör att effektivt ansluta befintliga fastigheter till 5GDHC, vilket kan utgöra en viktig pusselbit för EUs utfasning av fossil energi. På likande sätt möjliggörs nyttjande av frikyla och köldbärare med högre temperatur än konventionellt, tex från borrhål.

Lågkonvektorkonceptet lämpar sig väl för ”Femte generationens termiska nät” (5GDHC), med låg temperatur på värmekällan och stora temperaturdifferenser. Med seriekopplade värmepumpar i 5GDHC uppnås hög verkningsgrad med föreslaget koncept, energirenoveringen möjliggör att effektivt ansluta befintliga fastigheter till 5GDHC, vilket kan utgöra en viktig pusselbit för EUs utfasning av fossil energi.

På likande sätt möjliggörs nyttjande av frikyla och köldbärare med högre temperatur än konventionellt, tex från borrhål. En faktor som möjliggjort prototypens prestanda är en ny typ (patenterade) av högeffektiva värmeväxlare i kombination med påtvingad konvektion. En avgörande faktor är seriekoppling av rumsvärmaren mot en tilluftvärmare, vilket möjliggör lägre returtemperatur på värmebäraren än rumsluftens temperatur.

## Summary

Heating of existing apartment buildings accounts for a large share of Sweden's and the EU's energy use. With today's energy price, it is difficult to renovate (from an energy saving standpoint) existing homes in Sweden with mechanical exhaust ventilation and obtain a pay-off time that is acceptable to decision-makers. To lower the threshold for carrying out energy renovations on the existing apartment building stock, this feasibility study has examined the possibility of achieving system benefits by replacing existing radiators with low-temperature convectors, which involve a relatively small renovation and low investment. Measurements on a prototype of a series-connected low-temperature convector showed that significant energy optimization can be achieved regardless of whether district heating or geothermal heat pumps serve the property. More favorable system temperatures can give about 70% reduced electrical power need, and 30% reduced electricity use for heat pumps, depending on conditions. The district heating gains are achieved more at the infrastructure level, mainly with increased condensate heat recovery in the combined heat and power plants.

The result that was measured was that dimensioning flow temperature to the properties' heating system can be reduced by about 20 K, to 35°C compared to conventional 55°C. The return temperature can be reduced even more, by about

25 K. One of the most important results is that it is possible to achieve a return temperature on the heat carrier from the low temperature convector prototype, which is lower than the room temperature. One factor that enabled the prototype's performance is a new type (patented) of highly efficient heat exchangers in combination with forced convection.

Reduced system temperature enables the use of low-value heat sources, which is a potential for both thermal networks and heat pumps. The low convector concept is well suited for the "Fifth generation thermal network" (5GDHC), with low temperature at the heat source and large temperature differences. With series-connected heat pumps in 5GDHC, high efficiency is achieved with the proposed concept, the energy renovation makes it possible to efficiently connect existing properties to 5GDHC, which can be an important piece of the puzzle for the EU's phasing out of fossil energy. In a similar way, the use of free cooling and coolants with a higher temperature than conventional is possible, for example from boreholes.

[Klicka här och skriv]

## Inledning

### Beteckningar och formler

VB	Värmebärare i värme- eller kylsystem
VB1	Värmebärare tillopp till VVX1
VB2	Värmebärare tillopp till VVX2
VB2 retur	Värmebärare retur från VVX2
RL1	Rumsluft in till VVX1. Cirkulationsflöde genom VVX1.
RL2	Rumsluft ut från VVX1.
Luftflöde	Hänvisar till respektive VVX i tabeller
TL1	Tilluft in. Ventilationsflöde med uteluft som leds in genom VVX2
TL2	Tilluft ut. Ventilationsflöde ut från VVX2
BL1	Blandningstemperatur på luft ut från VVX1 och VVX2.
Effekt	Avser tex värme- eller kyleffekt i VB eller i RL respektive TL.
Eleffekt	Avser tex el till värmepumpars kompressor
COP	Kvoten mellan insats el och nyttig termisk energi i en värmepump.
Dimensionerande effekt	Det största förväntade effektbehovet [kW] under ett normalår. Normalt fåtal timmar/år.
dT	Temperaturdifferens [K].
dTln-konvektor	Logaritmisk temperaturdifferens [K]. Definition enligt konvektortillverkare.
dTln-VVX	Logaritmisk temperaturdifferens [K]. Generell definition för VVX.

Formler:

$$dTln - konvektor: = \frac{\Delta T_1}{\ln(\Delta T_1 / (T_2 - T_3))} = \frac{(T_1 - T_2)}{\ln((T_1 - T_2) - (T_2 - T_3))}$$

$$dTln - VVX: = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{(T_1 - T_2) - (T_3 - T_4)}{\ln((T_1 - T_2) - (T_3 - T_4))}$$

Nedan ekvationer visar sambandet för det teoretiskt maximala COP, dvs Carnot-verkningsgraden.

$$COP_{c,c} = \frac{P_{c,c}}{P_{e,m,c}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad E_W = \frac{T - T_0}{T} Q = q \cdot Q$$

COPc	Carnot-Coefficient of Performance kyla: kvoten mellan nyttig termisk energi och elinsatsen.
Pc	Effekt kyla
Pe	Effekt insats el
T2 och T0	Initiala temperaturen
T och T1	Temperatur efter temperaturförändring. Temperaturdifferens = T1-T2
Ew	Energi utfört arbete, tex kompressorns arbete
Q	Termisk effekt
q	Flöde på media

### Bakgrund

Befintliga flerbostadshus är relativt svåra att energirenovera, utan stora entreprenader och höga investeringskostnader. Dagens energipriser och små möjligheter att få tillbaka investeringen från hyreshöjningar, bidrar till en låg energirenoveringstakt i förhållande till nationella klimatmål. Att hushålla med exergi, dvs energikvaliteten, brukar ofta möjliggöra energioptimering. Att hushålla med temperaturnivåer utgör en form av exergihushållning. Hög temperatur i värmesystem erfordrar generellt större behov av elenergi till värmepumpar och högre andel fossila bränslen till fjärrvärme. Denna förstudie undersökte därför om mer optimala systemtemperaturer är möjliga att uppnå med relativt liten energirenovering. Det som specifikt studerades var om likvärdig komfort och värmeeffekt kan uppnås med lägre systemtemperaturer, genom att befintliga radiatorer byts mot effektivare lågtemperatur-konvektorer. För att sänka tröskeln för investering avseende sådan energirenovering, undersöktes även möjligheten till att distribuera frikyla, från tex borrhål, via det befintliga värmesystemet och lågtemperaturkonvektorer.

Efterfrågan av kyla i lägenheter ökar, och främst för småaggregat i respektive lägenhet [1] (Rolfman et al). Electricity, som är en samarbetspartner i detta projekt, uppger att efterfrågan av komfortkyla i deras bostadsrättsföreningar är mycket stort. På sikt kan det inverka stort på bostadssektorns energianvändning, om inte energieffektiva alternativ erbjuds. Jämfört med att respektive

lägenhetsinnehavare installerar AC till lägsta pris, utgör frikyla från borrhål ett väsentligt hållbarare alternativ, både map energi och köldmediumläckage. Det utgjorde ytterligare skäl, utöver att sänka tröskeln för energirenovering, till att undersöka möjligheten till frikyla via lågtemperaturkonvektorer.

Gynnsammare systemtemperaturer ger energieffektivare värmepumpsdrift, under förutsättning att värmepumparnas kondenseringstemperatur sänks. När det gäller termiska nät (så som fjärrvärme) uppnås energieffektiviteten i nätet och kraftvärmeverken, främst i form av ökad kondensvärmeåtervinning, vilket resulterar i minskad andel fossila bränslen vid topp effekter. Avseende femte generationens termiska nät (5GDHC: 5 Generation District Heat Cool) har låg framledningstemperatur en mer avgörande roll, och i en nära framtid inom EU kan lågtemperaturlösningar i fastigheter spela en avgörande roll.

Exergiförluster indikerar hur mycket el som teoretiskt erfordras för en värmepump, beroende på temperaturlyft. Rent praktiskt brukar förlusterna vara så pass stora att det krävs minst dubbelt så mycket el för Carnotprocessen. Den praktiska betydelsen är dock att det finns ett starkt samband mellan värmepumpens elbehov och hur stort temperaturlyft den skall åstadkomma. Därmed är exergi en indikator hur väl man hushållar med energikvalitet. Ju lägre exergiförlust, dess bättre har man lyckats hushålla med energi-kvaliteten. Carnot-verkningsgraden beskriver tex hur stor den teoretiska verkningsgraden (utan förluster) hos en värmepump blir vid ett visst temperaturlyft. Ju högre carnot-verkningsgrad, dess högre blir i regel den verkliga verkningsgraden, dvs COP för värmepumpen. Lågtemperatur konvektorerna minskar exergiförlusterna för carnot-processen, genom att sänka kondenseringstemperaturen och minska insatsen el för processen.

### **Syfte och mål**

Målet är att visa att energioptimering kan uppnås genom att byta konvektorer, att det är genomförbart samt visa dess potential. En viktig del i detta är mätresultat på en prototyp, som objektivt visar om lågtemperaturkonvektorn fungerar i verkligheten.

Det övergripande målet är att sänka tröskeln för energirenoveringar för det stora beståndet av befintliga flerbostadshus, med ett koncept som innebär relativt små byggåtgärder och låga entreprenadkostnader. Ett syfte på samhällsnivå är att möjligheterna till ökad användning av lågtempererade värmekällor förbättras, dvs användning av ”överskottsvärme” samt fjärrvärmeretur och dess indirekta inverkan i form av ökad verkningsgrad i kraftvärmeverk. Ett annat övergripande syfte på samhällsnivå är att minska elanvändningen för värmepumpar, både gällande topp effekter och elenergi under året.

Ett huvudsyfte är därför att dimensionera och utvärdera en lågtemperaturkonvektor-prototyp, med avseende på dess prestanda. Med prestanda avses avgiven värmeeffekt och kyleffekt, i förhållande till påtvingad

konvektion, temperatur och storlek. Ytterligare syfte är att utvärdera och analysera potentiella systemvinster som kan uppnås genom att installera lågtemperaturkonvektorn, jämfört med konventionella konvektorer. Med systemvinst avses fördelarna med lägre systemtemperaturer vid värmebehov, samt högre systemtemperaturer vid frikyla. Systemvinsterna beaktas bland annat ur perspektiv med energioptimering, komfort och sänkt tröskel för att genomföra sådan energirenovering. Ytterligare ett syfte är att belysa fördelar med systemvinsterna på samhällsnivå, så som att bidra till ett stabilare, effektivare och miljövänligare termiskt nät samt elnät.

Det övergripande syftet med konceptet, att byta befintliga radiatorer till lågtemperaturkonvektorer, är att erhålla fördelaktiga systemtemperaturer i fastighetens värmesystem, samt att kunna distribuera frikyla via befintligt rörsystem.

Ett av studiens syften är att påvisa fördelarna för flerbostadshus att ha ett värmesystem med låg temperatur, samt möjlighet till frikyla.

Kommunikationsmål:

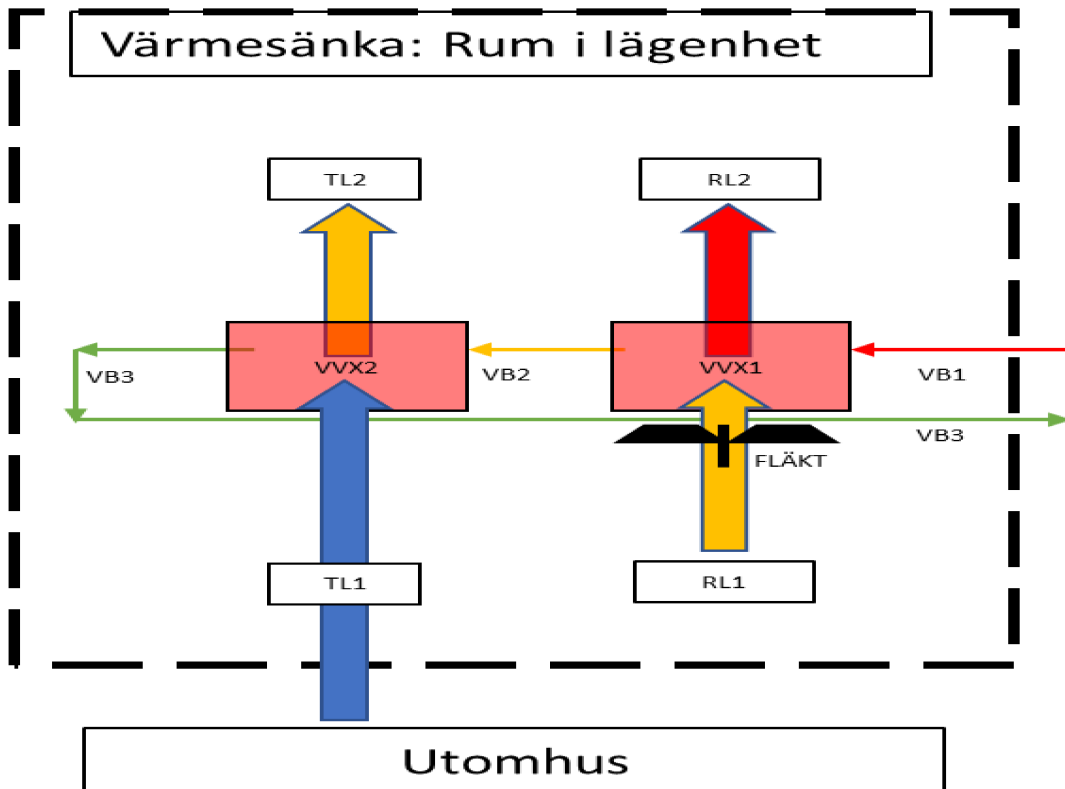
- tillverkande företag ska känna till och förstå potentialen av en konvektor av lågtemperaturtyp samt hur den ska vara dimensionerad
- fastighetsägare- och förvaltare ska känna till att lågtemperaturprodukter finns och att de har en positiv inverkan på energianvändning och komfort

Detta kommuniceras genom en populärvetenskaplig artikel samt genom lunchföreläsningar via Energi- och miljötekniska föreningen.



## Genomförande

Lågtemperaturkonvektorn består av två seriekopplade luft-vatten-värmexlare (V VX) enligt figur 1. Se förteckning över beteckningar för förklaringar. VX1 tar emot tillloppet från värmesystemets värmebärare och avger värmeeffekt till den cirkulerande rumsluften. En fläkt åstadkommer luftcirkulationen genom V VX1. Den seriekopplade V VX2 tar emot returflödet (VB2) från V VX1 och avger värmeeffekt till tilluften (TL1). Eftersom V VX1 respektive V VX2 i prototypen är olika stora och har olika egenskaper, visas deras prestanda i separata diagram i senare kapitel.



Figur 1. Schematisk illustration av prototypen, med två V VX. Uteluftvärmaren är kopplad i serie efter rumsvärmarens värmebärare-retur.

Förstudien var uppdelad i 4 arbetspaket:

### AP1 Prototypbygge

- Byggnation av lågtemperaturfläktkonvektor bestående av två seriekopplade separata värmexlare (rumsluftvärmare och förvärmning av tilluft) som på så sätt uppnådde stor differens mellan tillopp- och returtemperatur på värmebäraren respektive köldbäraren.
- Kravspecificering på relevanta egenskaper för måluppfyllelse såsom geometriska krav, tryckfall, design av vätskeinkoppling mm. togs fram gemensamt i projektgruppen.

- En prototyp byggdes med design av olika värmeväxlare.
- Innoheat AB svarade för design av värmeväxlarna anpassade för den produkt och de egenskaper som efterfrågades, samt tillförde kunskap om vad som var tekniskt möjligt och lämpligast.
- Acticon AB stod för tätt hölje med uteluftdon samt montering av prototypen och erforderliga anslutningar, så att representativa prestandatest kunde utföras.

### **AP2 Prestandatest genom mätningar på prototyp.**

- Provplan togs fram tillsammans i projektgruppen.
- Prototyp testades på RISE laboratorium i Borås för att mäta dess prestanda. Samband mellan storlek, tryckfall, konvektion, systemtemperaturer, rums- och ute-temperatur utvärderades. Både värme- och kylprestanda mättes i ett brett användningsspektrum genom att utetemperatur, systemtemperatur och luftflöde varierades.
- Prestanda på prototyperna analyserades och jämfördes med tillverkardata för konventionella radiatorer och konvektorer. Syftet var att utvärdera prestandan för att kunna beräkna energioptimeringspotentialen. Beräkningar utfördes för att undersöka hur mycket systemtemperaturen inverkar på effekt och energi, samt i koldioxidekvivalenter per kWh och exergiförluster.

CO<sub>2</sub>-ekvivalenter påverkas utöver energianvändningen även av vilken kvalitet (exergi) energislaget har. För värmepumpar är det el-användningen och med termiska nät som värmekälla är det temperaturen på värmen (och kylan), och tex åtgång av fossila bränslen som det leder till.

### **AP3 Analys och lönsamhetsstudie**

- Tekniklösningens genomförbarhet, lönsamhet, fördelar med ökad komfort samt dess hållbarhetsaspekter analyseras. Detta innefattar analys av:
  - Påverkan på energiprestanda
  - Påverkan på komfort
  - Potential för att erbjuda komfortkyla
  - Lönsamhetsanalys, vilket inkluderar tillverkningskostnad, installations- och entreprenadkostnad, driftkostnader och energibesparingar samt miljönytta på energisystem- och samhällsnivå. Möjligheter till gynnsamma energiavtal som följd av låg systemtemperatur och minskad toppeffekt belyses, samt att själva byggentreprenaden för energireovering inte behöver vara så omfattande som ofta utgör ett hinder.

#### AP4 Projektleddning och kommunikationsaktiviteter.

- Målgrupper var tillverkande företag av ventilations- och uppvärmningsprodukter, fastighetsägare och förvaltare av flerbostadshus, energibolag, entreprenörer, konsulter och bostadsrättsföreningar. Dessa främst nåddes via artikel i Energi- och miljö samt via digitala seminarier i EMTF (se gärna [https://www.youtube.com/channel/UCzTaSDCFo\\_O3ogHzAhuci-g/featured](https://www.youtube.com/channel/UCzTaSDCFo_O3ogHzAhuci-g/featured)). Resultat delades kontinuerligt i projektgruppen. Resultat från projektet delades även via Celsius Toolbox, som är ett uppslagsverk för lösningar för värme och kyla i städer. Celsius Toolbox är ett samarbete mellan 5 olika aktörer och finansieras med offentliga medel. Energimyndigheten är en av finansörerna.
- Resultat sprids även via ElectriCITY, som utgör ett internationellt skyltfönster för hållbara stadsdelar och energieffektiv teknik.

#### Indata och beräkningar

Energiberäkningen för värmepumpsdrift är utförd i ProPack, ett simuleringsprogram specifikt för kyl- och värmepumpsanläggningar, där timvärden för ett normalår beräknas. Det innebär att 8760 driftfall beräknas, med avseende på temperaturer och effekt, vilket integrerar kompressorns elanvändning under ett år. Beräkningarna är realistiska, eftersom normala förluster är inlagda inklusive data från tillverkare. Beräkningen är gjord med köldmedium R600 och med kompressor Bock EX-HG6/1080-4S med 7 kompressorsteg och frekvensstyrning. Med 7 kompressorsteg samt frekvensreglering ner till 30 Hz (motsvarar 60% av kapacitet vid 50 Hz) kan kapacitetsregleringen ge kontinuerlig drift ner till ca 8% av maxeffekten.

Energianvändningen för värmepumparna beräknas både för ett värmesystem med konventionella konvektorer, med 55 °C dimensionerande framledningstemperatur samt med lågtemperaturkonvektorer för olika temperaturer i värmesystemet.

Bostädernas värmebehov beror i hög grad av utomhustemperaturen. Konventionella värmesystem i bostäder med radiatorer brukar regleras för att hålla ett någorlunda konstant flöde. Metoden är normalt att styra värmebärandens tillloppstemperatur efter utomhustemperaturen. Det ger konstant flöde i systemet under förutsättning att framledningstemperaturen motsvarar värmeeffektbehovet i huset (i verkligheten avviker det mer eller mindre pga rumstermostater). Värmeeffekten regleras konventionellt, med högst tillloppstemperatur vid dimensionerande utomhustemperatur och väsentligt lägre temperatur övriga drifttimmar under året. Med 55 °C dimensionerande framledningstemperatur kommer ca 45 °C vara mer vanligt förekommande, dvs fler drifttimmar/år. Diagram 1 visar antagen framledningstemperatur för ett konventionellt värmesystem med 55/45 °C i tilllopp- och returtemperatur, hädanefter kallat 55/45-system. Diagram 1 visar även systemtemperaturen för lågtemperaturkonvektorn.

Diagram 1 är utformat som varaktighetsdiagram, med 8760 timvärden sorterade efter de högsta först och i fallande ordning. I diagram 1 redovisas antagna

framledningstemperaturer på de tre temperatursystem som beräknas. Vanligast förekommande temperatur på flerbostäders värmesystem är dimensionerande tilloppstemperatur på 55 °C, och returtemperatur 45 °C (55-system) och har stora temperaturvariationer map utetemperatur och effekt. I diagram 1 är värmepumparnas kondenseringstemperatur satt till 5 K varmare än tilloppstemperaturen. Lågtemperaturkonvektorernas systemtemperatur är satta till dimensionerande tilloppstemperatur på 45 °C (45-system), 35 °C (35-system) och 28 °C (28-system). 28-system har nära på konstant tilloppstemperatur, eftersom värmeavgivningen blir för låg med lägre temperatur. Störst skillnad i temperatur uppstår vid årets timmar med högt effektbehov.

Framledningstemperaturen (VB1) för fastighetens värmesystem, som har ett direkt förhållande till effektbehov, erfordrar ca 5 K varmare kondenseringstemperatur. Även temperaturen från borrhålen beror av upptagen effekt (samt aktuell temperatur i berget), och erfordrar dimensionerande ca 10 K lägre temperatur i förångaren (T förångning), främst pga överhettning före kompressorn. Skillnaden i förångningstemperatur (beror av bergets temperatur, som i sin tur beror av effekt) emellan systemen är så liten att den inte går att uttyda i diagrammet. Diagram 1 utgör indata för energi- och effektberäkningar för de olika systemtemperaturerna. Indata för temperaturlyftet mellan kondensor respektive förångare i värmepumpen blir avgörande för besparingspotentialen. Ju varmare värmekällan antas vara, dess större blir besparingen procentuellt. Förångningstemperaturen är satt relativt lågt (för bergvärme), för att undvika för optimistiska resultat på potentialen.

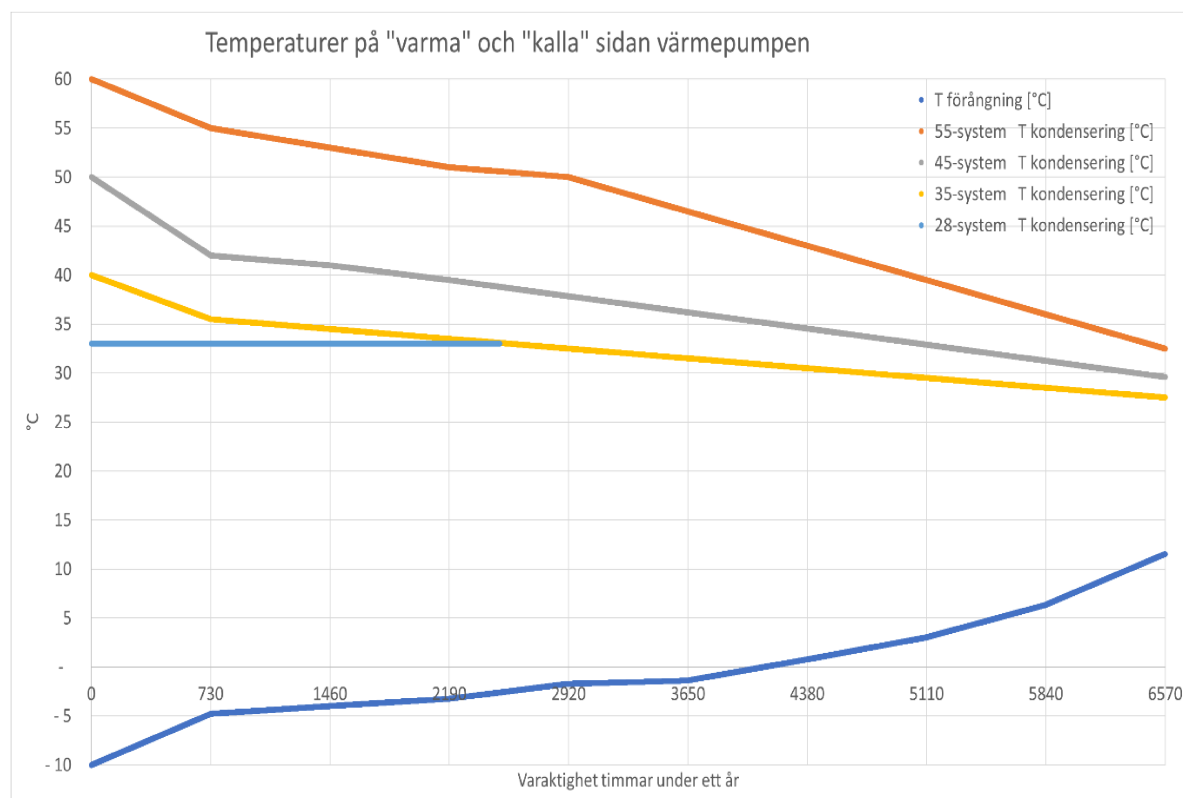


Diagram 1 Indata Temperaturer för beräkning i ProPack

## Resultat

En sänkning av systemtemperaturen kan ge systemfördelar i form av minskad elanvändning till bla värmepumpar, lägre returtemperatur i fjärrvärmnät, samt frikyla. Det som särskiljer konvektorprototypen är dess låga systemtemperaturer och dess förmåga att nyttja frikyla. Det möjliggörs med en samverkan mellan ett antal systemaspekter.

- I stället för en konventionell radiator, användes en högeffektiv värmeväxlare. Dess kompakta mått gjorde den lämpad som konvektor (radiator med stor andel konvektion och liten andel strålning).
- konventionella radiator avger största delen av sin värme genom naturlig konvektion, dvs varmluftens stigitkraft. Prototypens värmeväxlare (VVX) ger väsentligt lägre tryckfall på luftsidan än VVX med lameller, men erfordrar påtvingad konvektion via en fläkt.
- En konventionell radiator får väsentligt högre värmeavgivning om den förvärmer inkommande tilluft, beroende på stor temperaturdifferens mellan luften och värmaren. I synnerhet på vintern kommer den kalla tilluften att öka värmeavgivningen från radiatoren/konvektorn.
  - Prototypen är avsedd för att värma inkommande tilluft (tilluftdon på baksidan), men skillnaden är att värmarna (för rumsluft respektive tilluft) är seriekopplade. Eftersom ökad temperaturdifferens samt tilluftens påtvingade konvektion effektiviserar värmeöverföringen [2] blir det möjligt att uppnå en hög värmeeffekt även med den låga returtemperaturen från rumsvärmaren. Se diagram 2.
- Kombinationen med en högeffektiv VVX, påtvingad konvektion och seriekoppling med returtemperaturen mot en tilluftvärmare ger hög verkningsgrad och kompakta mått.
- Ju större luftflödet är, dess effektivare värms omgivande ytor på väggar och tak, vilket ökar dess värmestrålning. Ökad operativ temperatur bidrar till ökad komfort [2].

Dessa egenskaper i samverkan möjliggör effektiv värmning av rumsluften och tilluften. Den höga verkningsgraden möjliggör en lägre tilloppstemperatur, samt en lägre returtemperatur. En vanlig systemtemperatur i befintliga bostäder vid dimensionerande effekt är 55 °C tillopp och 45 °C retur, dvs temperaturdifferens (dT) 10 K. Med konvektorprototypen uppmättes ca 50% större dT (15 K) vid dimensionerande effekt.

Lägre tilloppstemperatur möjliggör högre verkningsgrad (COP) för värmepumpar. Även låg returtemperatur utgör en möjlighet till högre COP, om värmepumpar seriekopplas. Att låg tilloppstemperatur upprätthålls även vid årets kallaste dagar utgör en fördel mot värmepumparnas eleffekttopp. Att hålla nere toppeffekten har blivit allt viktigare för det svenska elnätet.

Fjärrvärme har ofta taxan utformad där energi- och abonnemangskostnaden påverkas av returtemperaturen, eftersom en hög temperatur påverkar rökgaskondenseringens verkningsgrad negativt. I synnerhet vid toppeffekter inverkar rökgaskondenseringen direkt på marginalenergin, som normalt utgörs av olja och gas. Olja och gas är dyr och har stor miljöpåverkan.

Konvektorprototypens avkylning är, tack vare seriekopplingen mot tilluft, effektivast då utetemperaturen är kall. Detta sänker returtemperaturen vid fjärrvärmens topplast, vilket minskar andelen fossila bränslen i fjärrvärmemixen.

Med fördelaktiga systemtemperaturer avses lägre tillopps- och returtemperatur samt större temperaturdifferens på värmebäraren. Det möjliggörs med effektivare värmeöverföring emellan värmebäraren och luft. Därmed kan lågtempererad värme användas, som ofta benämns spillvärme eller överskottsvärme. Så länge värmekällan (tex spillvärme) är varmare än returtemperaturen, är det fysiskt möjligt att avsätta och överföra den till värmebäraren. I tex 5e generationens termiska nät skulle överskottsvärme från tex datacenter eller livsmedelsbutiker kunna avsättas till fastigheter med lågtemperaturkonvektorer, så som prototypen. På samma sätt kan låg temperatur från värmepumpar avsättas.

Prototypen har tre viktiga egenskaper som ökar värmeväxlarnas verkningsgrad, dvs dess värmeöverförande förmåga:

1. Högeffektiva värmeväxlare (V VX1 och V VX2) ger effektiv värmeöverföring
2. Påtvingad konvektion, via fläkt (V VX1) samt via tilluftsdon (V VX2).
3. Seriekopplat utförande, där lägsta temperaturen på värmebäraren möter den kallaste luften.

Resultaten från mätningar i laboratoriet, som redovisas i nedanstående stycke, visar hur mycket respektive egenskap påverkar värmeöverföringen.

#### *Rumsvärmare V VX1 i prototyp*

Prototypen har två olika långa plattvärmväxlare från Innoheat. De är av samma typ, men har olika antal plattor. V VX1 är 2,7 gånger längre än V VX2 (160 plattor kontra 60 plattor). V VX2 har dimensionerats så pass mycket mindre eftersom den blir mycket effektivare, tack vare stora temperaturdifferenser mot inkommande uteluft.

V VX1 är effektivare än konventionella konvektorer vid låga systemtemperaturer och påtvingad konvektion. Effektiv värmeöverföring möjliggör både sänkta framlednings- och returtemperaturer, vilket möjliggör att konvektorn kan hållas

kompakt, vilket underlättar brukares acceptans. Konventionella konvektorer med flera paneler förses ofta med konvektionsplåtar (veckad plåt) som syftar till att öka värmeavgivningen, vilket är en variant av värmeväxlare.

VVX1 blir med sina 160 plattor 270 mm lång, och har i likhet med VVX2 måtten 480 mm hög 150 mm djup. Prototypen jämfördes med data från 1 m lång konventionell konvektor, som var 500 mm hög, med dubbla paneler och med konvektionslåt (ca 135 mm ut från vägg). För att kunna jämföras med konventionella konvektorer, beräknas den logaritmiska medeltemperatur-differensen fram på samma sätt, dvs differensen mellan omgivande luft och värmande yta. Se formel för  $dT_{ln}$ -konvektor. Mätningar på VVX1 gjordes endast upp till 45 °C. Data vid framledningstemperatur 55 °C har tagits fram med antagande att VVX1s linjära kurva i diagram 3 gäller även vid högre framledningstemperaturer. Se diagram 3.

Radiator tillverkare brukar beräkna den varma ytans medeltemperatur logaritmiskt, till skillnad från temperaturen på omgivande luft. Den omgivande luftens medeltemperatur beräknas inte, utan definieras som rumstemperaturen. Temperaturdifferensen mellan varm yta och luft tar således inte hänsyn till att luften blir varmare längs med den varma ytan. Det är ett adekvat sätt att beskriva samband mellan systemtemperatur respektive rumstemperatur (lufttemperatur) vid dimensionering av konvektorer. För att kunna jämföra prestanda emellan lågtemperaturkonvektorns VVX1, (som värmer rumsluft), och konventionella konvektorer, används samma mått på temperaturdifferens.

Tabell 1 visar tillverkardata för vanliga konvektortyper i lägenheter, samt uppmätt data för VVX1 (den som avger värme till rumsluften) i prototypen. Syftet med den jämförelsen är att påvisa skillnaden i prestanda hos själva värmeväxlaren, vilken spelar en avgörande roll för hela prototypens prestanda. Samtliga konventionella konvektorer i tabell 1 är 500 mm höga och 1000 mm långa, med olika antal paneler och konvektionsplåtar. Jämförelsen dem emellan har gjorts med olika tilloppstemperatur på värmebäraren (VB1) i spannet 55-40 °C.

Ur tabell 1 framgår det t.ex. att vid tilloppstemperatur 55 °C, i driftfall 2 respektive driftfall 6, avger prototypen ca dubbla värmeeffekten. Driftfall 5 och 6 är identiskt, förutom att luftflödet genom VVX1 är halverat till 20 l/s, vilket i princip halverar effekten. En stor skillnad är förmågan hos VVX1 att uppnå stort  $dT$  mellan VB1 och VB2. Med ett högre flöde hos VVX1 skulle returtemperaturen och därmed  $dT_{ln}$  öka, liksom avgiven effekt. En viktig egenskap hos VVX1 är dess förmåga att avge hög värmeeffekt, trots relativt låg returtemperatur.

Tabell 1: Effekt värme från prototyp rumsvärmare map olika systemtemperatur.

Värmedrift		°C	°C	°C	K			W
Index driftfall	Konventionell	VB1	VB2	RL1	dTIn			Effekt
1	K 21	55,0	45,0	21,0	28,7			550
2	K 22	55,0	45,0	21,0	28,7			700
3	K 22	45,0	35,0	21,0	18,6			400
4	K 22	40,0	30,0	21,0	13,4			250
Värmedrift		°C	°C	°C	K		l/s	W
Index driftfall	Prototyp	VB1	VB2	RL1	dTIn		RL1	Effekt
5	VVX1	55,0	40,0	21,0	25,8		40	1 440
6	VVX1	55,0	40,0	21,0	25,8		20	700
7	VVX1	45,0	30,0	21,0	15,3		20	420
8	VVX1	40,0	28,1	20,9	12,2		40,2	700

Konvektor K21	Två paneler med en konvektionsplåt
Konvektor K22	Två paneler med två konvektionsplåtar
Konvektor K21 + TD	Två paneler med en konvektionsplåt med tilluftsdon
Konvektor K22 + TD	Två paneler med två konvektionsplåtar med tilluftsdon

Konventionella konvektorer med naturlig konvektion (självdreg med ”skorstensverkan”) påverkas i hög grad av framledningstemperaturen. Ju lägre temperaturskillnaden är gentemot rumstemperaturen, dess mindre naturlig konvektion. Sambandet mellan avgiven effekt och tilloppstemperatur är exponentiellt, eftersom både naturlig konvektion (varmluftens stigningskraft) och strålning har exponentiella samband, vilket också avspeglas med exponentiella kurvor i diagram 2. Tabell 1 och diagram 3 visar hur VVX1s värmeeffekt påverkas då framledningstemperaturen sänks från 55 °C till 45 °C. I diagram 2 har även kurvor för konventionella konvektorer med installerade tilluftsdon (med tillägg ”+TD”) lagts in, med tilluftflöde 10 l/s och temperatur -16 °C. Tilluftflödet ökar både konvektionen och värmeöverföringen, och ger en påtaglig effektökning. Denna typ av konvektorer, försedda med tilluftsdon, är installerade i många av Electricitys bostadshus. Index A, i diagram 2, visar att driftfall med samma dTIn som driftfall 3 ger nära på dubbla effekten med tilluftsdon, jämfört med utan.



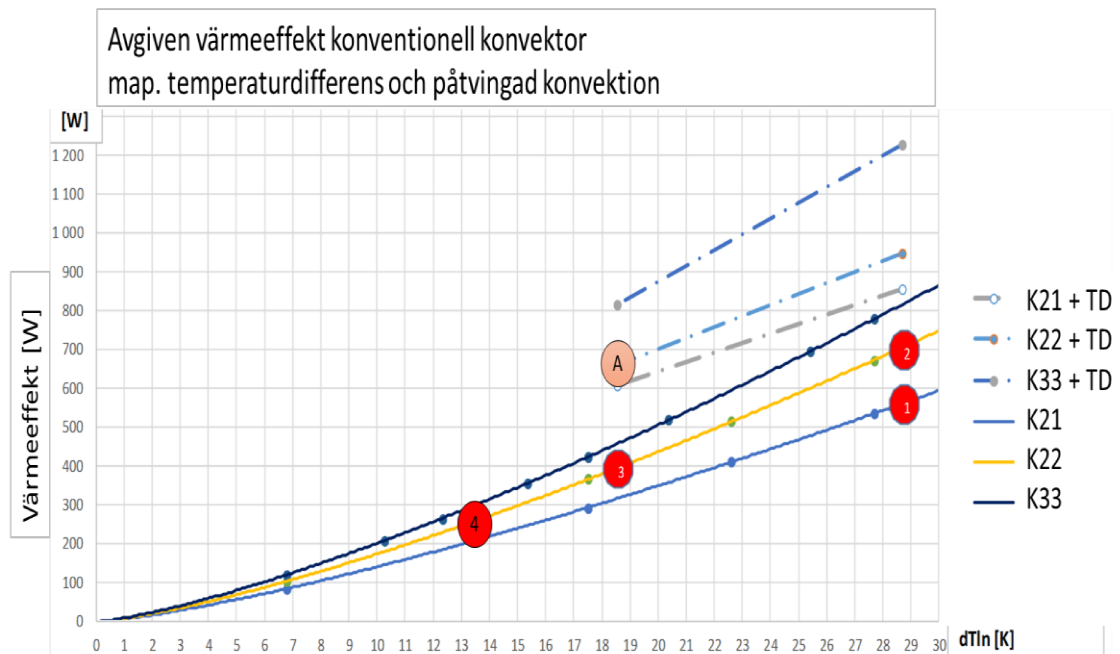


Diagram 2 Värmeeffekt från konventionell rumsvärmare

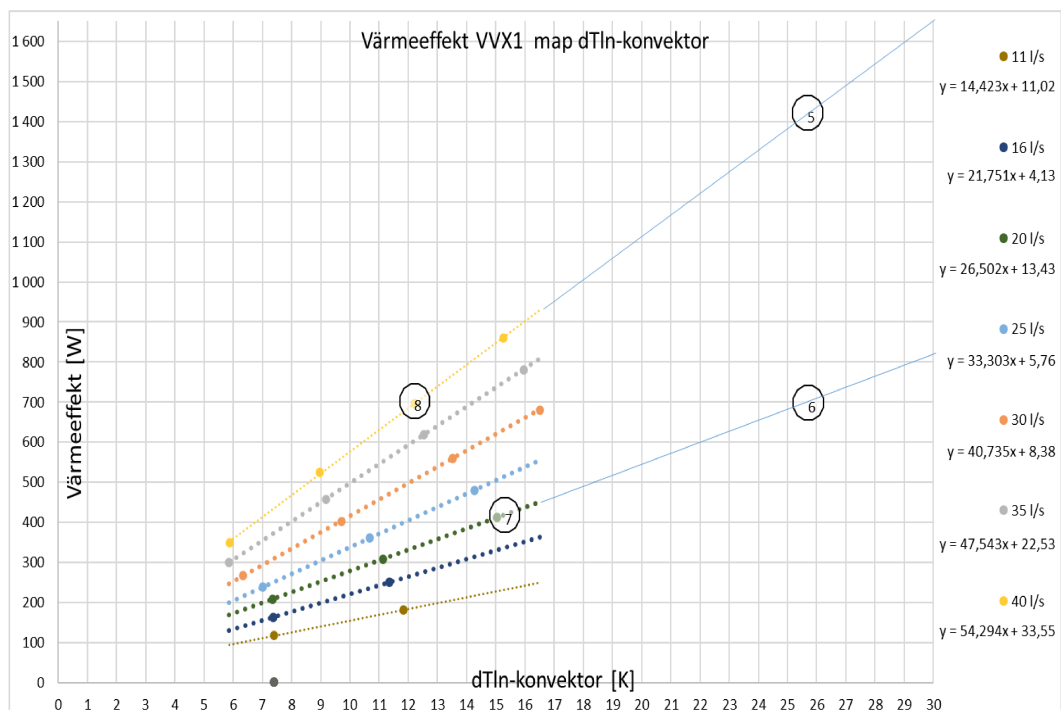


Diagram 3 Värmeeffekt från prototyp rumsvärmare

Diagram 2 och diagram 3 visar värmeeffekt från map olika systemtemperatur. Sifferindex anger driftfall enligt tabell 1. Punkterna utgör mätvärden map beräknat dTln-konvektor (se "Beteckningar och formler"). Diagrammen visar skillnaden mellan konventionella radiatorer och prototypens VVX1 map värmeeffekt, med lika hög tilloppstemperatur (dock olika logaritmisk temperaturdifferens pga returtemperaturen skiljer sig).

### *Tilluftvärmare VVX2 i prototyp*

VVX2 har 60 plattor, vilket utgör ca 38% av VVX1s 160 plattor. Dess värmeavgivande yta mot luften är därmed ca 38% av VVX1s. Eftersom omgivande luft vid dimensionerande effekt är kall på vintern, så ger det en stor temperaturgradient emellan varm yta och kall luft, vilket ökar värmeeffekten. Trots skillnaden i dimension, så avger VVX2 ungefär lika hög effekt som VVX1 vid dimensionerande driftfall. Se tabell 2.

### *Seriekoppling av VVX1 och VVX2 i prototyp*

Ett av de viktigaste resultaten är att det är möjligt att uppnå en returtemperatur på värmebäraren från lågtemperaturkonvektor-prototypen, som är lägre än rumstemperaturen. Det skiljer sig markant från konventionella konvektorer. Ytterligare ett viktigt resultat är att ju kallare det är ute, dess effektivare blir lågtemperaturkonvektorn samt ger lägre returtemperatur på värmebäraren.

Tabell 1 visar att värmeavgivningen från prototypens rumsvärmare är effektivare än från konventionella konvektorer, främst vid låga  $dT_{ln}$ -konvektor [K]. Effektiv värmeavgivning innebär att returtemperaturen blir lägre, med samma värmebärrflöde, vilket innebär högre avgiven värmeeffekt. Konceptet med lågtemperaturkonvektorn syftar till att uppnå hög värmeeffekt med låg tillopp- och returtemperatur. Att VVX1 och VVX2 enligt mätningar avger hög effekt med låg systemtemperatur är ett viktigt resultat, och förklaras av VVX höga prestanda i kombination med seriekoppling.

Den teoretiska gränsen för möjlig värmeöverföring sätts av temperaturdifferensen mellan luften och värmaren. Enligt termodynamikens lagar måste värmebäraren vara något varmare än omgivande luft, dvs ge en temperaturgradient, för att VVX skall kunna avge värmeeffekt. Det innebär att VVX1 inte kan få lägre returtemperatur än rumstemperaturen och att VVX2 inte kan få lägre returtemperatur än tillufttemperaturen. Den logaritmiska medeltemperaturen i en VVX måste vara högre än omgivande luft för att kunna avge värme.

Om VVX2 har ett tilluftflöde som har lägre temperatur än VB2 från VVX1, uppnår VVX2 en högre logaritmisk medeltemperatur än luften och temperaturgradienten möjliggör därmed värmeöverföring. Detta är principen bakom att seriekoppling av VVX1 och VVX2 möjliggör en högre värmeavgivning och lägre returtemperatur jämfört med parallellkopplade VVX. Seriekopplingen av VVX1 och VVX2 kan därmed effektivt nyttja lågtempererad värmebärare som inte är möjligt med en konventionell konvektor.

Lågtemperaturkonvektorn i sin helhet består av VVX2 i serie efter VVX1 (se figur 1), och den totala värmeavgivningen blir summan av rumsluftens (RL) och uteluftens (TL) värmeupptag. RL genom VVX1 är variabelt med en fläkt, och utgör ett cirkulationsflöde av rumsluft. TL genom VVX2 utgör tilluften, och hölls vid mätningar på konstant 10 l/s.

För värmeväxlare brukar  $dT_{ln}$  definieras genom att beräkna medeltemperaturen på både luften och den varma ytan logaritmiskt och temperaturdifferensen dem emellan.

$$dTln VVX: = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{(T_1 - T_2) - (T_3 - T_4)}{\ln((T_1 - T_2) - (T_3 - T_4))}$$

Tabell 2 visar mätdata från driftfall med avgiven värmeeffekt från VVX1 och VVX2 i ett seriekopplat utförande, som utgör lågtemperaturkonvektor-prototypen. Eftersom lågtemperaturkonvektor-prototypen är avsedd för en tilloppstemperatur på värmebäraren (VB1) som är lägre än de konventionella dimensionerande 55 °C, har driftfall med dimensionerande 35 °C på VB1 valts. Den påtvingade konvektionen genom VVX1, dvs RL via fläkten, har mycket stor inverkan på avgiven värmeeffekt. För VVX2 med konstant TL, är dTln avgörande för effekten. Sju olika flöden på TL genom VVX1 mättes upp och ger sju olika kurvor i diagram 2, en per luftflöde.

Ett tydligt samband är att avkylningen på VB, dvs temperaturdifferensen (dT) mellan VB1 och VB3, i hög grad är beroende av luftflödet genom VVX1. Luftflödet inverkar även på lufttemperaturen ut från VVX1: ju lägre flöde RL dess närmare kommer RL2 till VB1-temperaturen.

*Tabell 2: Effekt värme från prototyp map olika flöde RL i VVX1 samt olika temperatur i VB2 till VVX2.*

Värmedrift	l/s	°C	°C	°C	°C	°C	K	K	K	°C	W
Index driftfall	RL1 och TL1	VB1	VB2	VB3	RL1	TL1	dTln	dT VB	dT TL2 och RL2	RL2 och TL2	Effekt
1 VVX1	40	35	26,1		20,8		9,90	8,9	10,9	31,76	522
VVX2	10		26,1	18,0		- 18,0	20,5	8,1	41,7	23,7	475
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>17,0</b>		<b>30</b>	<b>997</b>
2 VVX1	35	35	27,3		21,4		9,3	7,8	11,1	32,5	455
VVX2	10		27,3	20,2		- 15,0	19,1	7,1	40,3	25,2	421
<b>Summa</b>	<b>45</b>							<b>14,9</b>		<b>31</b>	<b>876</b>
3 VVX1	30	35	28,2	-	21,5	-	8,9	6,8	11,4	32,9	403
VVX2	10		28,2	21,6		- 10,2	17,4	6,6	36,3	26,2	385
<b>Summa</b>	<b>40</b>							<b>13,4</b>		<b>31</b>	<b>788</b>
4 VVX1	25	35	28,9		21,0		8,8	6,1	12,2	33,2	360
VVX2	10		28,9	23,1		- 5,0	15,2	5,7	31,8	26,9	335
<b>Summa</b>	<b>35</b>							<b>11,9</b>		<b>31</b>	<b>694</b>
5 VVX1	20	35	29,7		21,0		8,3	5,3	12,3	33,3	309
VVX2	10		29,7	24,6		- 0,0	13,4	5,1	27,8	27,8	301
<b>Summa</b>	<b>30</b>							<b>10,4</b>		<b>31</b>	<b>610</b>
6 VVX1	16	35	30,8		21,4		7,5	4,2	12,0	33,4	251
VVX2	10		30,8	26,3		5,0	11,6	4,5	23,9	28,9	262
<b>Summa</b>	<b>26</b>							<b>8,7</b>		<b>32</b>	<b>513</b>
7 VVX1	11	35	31,9		21,5		6,4	3,1	11,5	33,1	182
VVX2	10		31,9	27,9		9,7	10,0	4,0	20,3	30,0	232
<b>Summa</b>	<b>21</b>							<b>7,1</b>		<b>32</b>	<b>413</b>

Driftfallen i tabell 2 visas i diagram 4 respektive diagram 5.

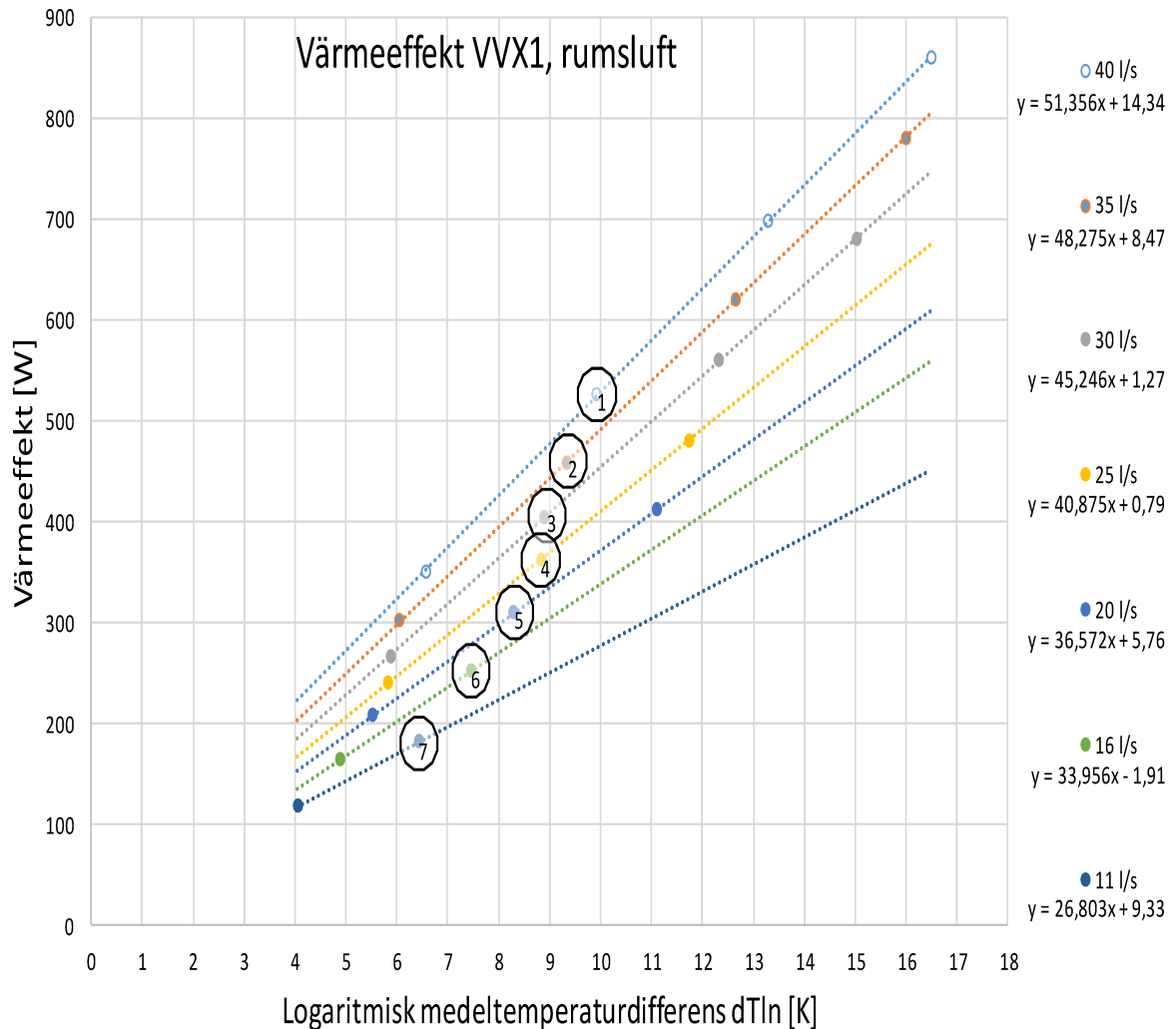


Diagram 4. Värmeeffekt från VVX1 för olika luftflöden av RL och  $dT_{ln}$ -VVX [K]. Sifferindex i graf anger driftfall enligt tabell 2. Punkter utgör mätvärden map beräknade  $dT_{ln}$ -VVX.

Sju driftfall enligt tabell 1, ett per luftflöde RL (påtvungad konvektion), har markerats i diagram 4. Tillloppstemperatur +35 °C har valts på VB1 för samtliga driftfall. Ju större den påtvungade konvektionen är, dess effektivare blir värmeavgivningen i VVX1. Pga. ökad värmeavgivning påverkas den logaritmiska medeltemperaturdifferensen,  $dT_{ln}$ -VVX, vilket syns i diagrammets markerade driftpunkter. Vid samma temperatur på VB1, syns ett s-format utseende på driftpunkterna för olika flöden på RL.

Vid luftflöde 40 l/s på RL blir returtemperaturen VB2 väsentligt lägre än vid 11 l/s på RL. Ju kallare den nedre delen av VVX1 är, dess lägre blir den varma ytans medeltemperatur. Eftersom VVX2 är seriekopplad efter VVX1, kommer värmebäraren VB2 till VVX2 att få lägre temperatur, ju större avkylning VVX1 har. VB2 utgör returen från VVX1 och samtidigt VVX2s tilllopp. Tabell 2 visar att fördelningen av värmeeffekten påverkas av hur stort luftflödet RL genom VVX1 är. Ju mer värme som avges till rumsluften från VVX1, dess lägre temperatur får

VVX2 vilket minskar avgiven effekt till TL. Sambanden ger också att lägre flöde på RL ger högre temperatur på VB2, vilket i sin tur ökar temperaturen på TL2.

Ett annat intressant samband som framgår i tabell 2 är att även om den totala värmeeffekten minskar med lägre systemtemperatur och minskad påtvingad konvektion, så påverkas blandningstemperaturen av RL2 och TL2 marginellt. Det har en positiv inverkan på komforten.

Diagram 5 visar samband för VVX2, mellan avgiven värmeeffekt och temperatur på TL. Mätningar gjordes endast för 10 l/s, som motsvarar vanliga luftflöden för tilluftdon i tex sovrum. Därmed finns det endast en kurva för påtvingad konvektion i diagram 5.

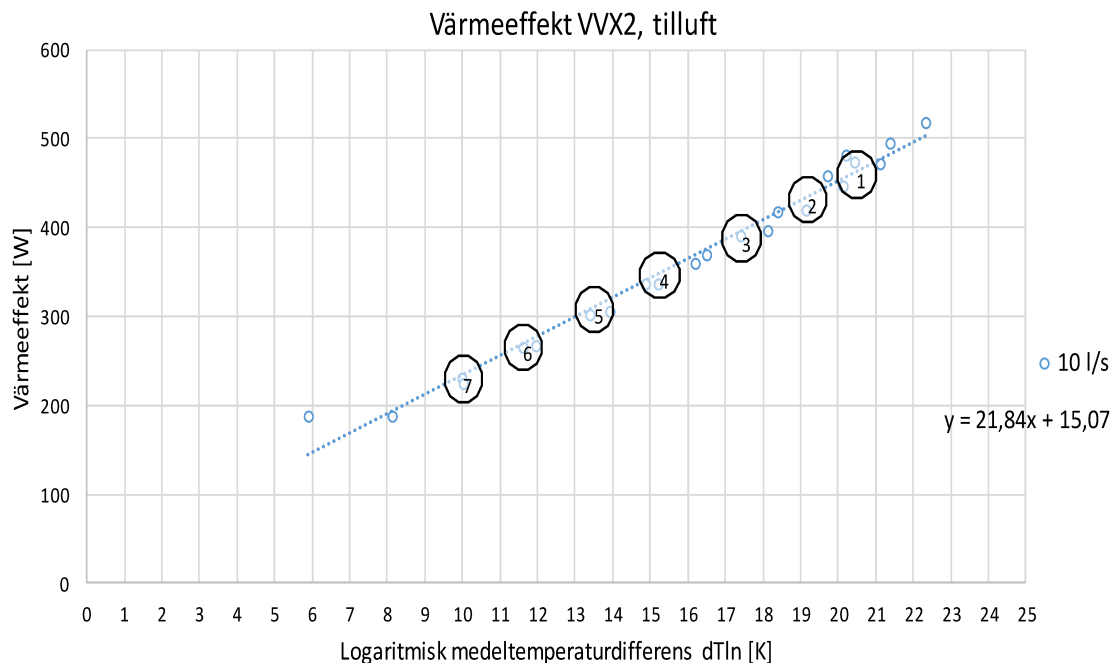


Diagram 5. Värmeeffekt beroende av temperatur. Sifferindex i graf anger driftfall enligt tabell 2.

I tabell 2 framgår att dTln för VVX2 blir mycket större än för VVX1, trots den lägre inkommande värmebärartemperaturen på VB2. TL-temperatur på tex -18 °C och -15 °C ger en mycket stor temperaturdifferens mellan TL1 och VB2, på ca 10–20 K. För VVX1 ligger dTln mot RL1 runt halva värdet, och har därmed en lägre temperaturgradient. Som framgår i diagram 4 inverkar dTln direkt på värmeavgivningen, och temperaturen på TL blir därför avgörande. Ju kallare det är ute, dess effektivare blir VVX2. Tabell 2 visar att VB3 från lågtemperaturkonvektorn kan bli lägre än rumstemperaturen, vilket inte hade varit fysiskt möjligt utan seriekoppling.

I diagram 4 och 5 kan samband utläsas, som gäller för värmeväxlare generellt, att lägre värmeeffekt möjliggör lägre dTln. Därmed kan systemtemperaturen sänkas vid lägre effektbehov.

### Prestanda i kyl drift, med frikyla

Diagram 1 och 2 gäller även för frikyla. Specifika mätningar i laboratoriet gjordes även för kyl drift, och mätresultat visas i diagram 5. Den räta grafens koefficient är identisk med den för värmedrift, dvs diagram 3 och 4. Temperaturgradienten mellan VVX1 yta och luften påverkar värmeöverföringen, oavsett om ytan är kallare eller varmare än omgivande luft. Skillnaden utgörs endast av om värmeöverföringen är negativ eller positiv.

DTIn blir generellt mindre i kyl drift än i värmedrift, i likhet med de flesta fastighetssystem. Med ett litet dTIn får den påtvingade konvektionen en ännu viktigare roll för att möjliggöra frikyla. En begränsning är att VB1 inte får vara kallare än ca 10–15 °C, för att hindra kondens på kalla ytor. VB1 måste hållas under daggpunkten, med marginal. I extremt fuktigt och varmt väder blir förvisso ofta kylbehovet som störst, och då uppstår risk för dagg redan vid 15 °C. Men stort kylbehov kan även inträffa med torrt klimat, med tex stark solstrålning genom fönster. Därför kan även driftfall med VB1 på 10 °C vara representativt även under dagar med stort kylbehov. Antalet fuktiga dagar/år med risk för kondens på ytor med 10 °C är väldigt få. Tabell 3 visar de driftfall som mättes på prototypen. För hög kyleffekt sattes flödet på RL till 40 l/s.

Tabell 3: Effekt frikyla för konvektor-prototyp map olika systemtemperatur och konvektion.

Kyl drift	l/s	°C	°C	°C	°C	°C	K	K	K	°C	W
Index driftfall	RL1 och TL1	VB1	VB2	VB3	RL1	TL1	dTIn	dT VB	dT TL2 och RL2	RL2 och TL2	Effekt
1 VVX1	40	10,0	20,3		25,7		11,0	10,3	11,7	14,0	596
VVX2	10		20,3	21,9		30,0	4,4	1,6	9,2	20,8	95
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>11,9</b>	<b>20,9</b>	<b>15,4</b>	<b>691</b>
2 VVX1	40	10,0	20,2		25,8		11,0	10,2	11,8	14,0	588
VVX2	10		20,2	21,1		25,0	2,2	0,8	4,4	20,6	50
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>11,0</b>	<b>16,2</b>	<b>15,3</b>	<b>637</b>
3 VVX1	40	15,1	22,0		25,8		7,5	7,0	8,1	17,7	409
VVX2	10		22,1	23,4		30,0	3,5	1,3	7,6	22,4	74
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>8,2</b>	<b>15,6</b>	<b>18,7</b>	<b>483</b>
4 VVX1	40	15,1	22,0		25,8		7,5	7,0	8,1	17,7	409
VVX2	10		22,0	22,5		25,1	1,4	0,5	2,9	22,2	29
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>7,5</b>	<b>10,9</b>	<b>18,6</b>	<b>438</b>
5 VVX1	40	20,0	24,0		25,9		4,2	4,0	4,4	21,5	234
VVX2	10		24,0	24,1		25,2	0,5	0,2	1,3	23,9	9
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>4,1</b>	<b>5,7</b>	<b>21,9</b>	<b>243</b>
6 VVX1	40	20,0	23,7		25,5		3,9	3,7	4,1	21,4	217
VVX2	10		23,7	24,7		30,1	2,9	1,0	6,3	23,8	58
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>4,7</b>	<b>10,5</b>	<b>21,8</b>	<b>275</b>
7 VVX1	40	20,0	27,3		30,7		7,6	7,2	8,0	22,7	422
VVX2	10		27,3	27,6		30,1	1,3	0,4	3,1	27,1	21
<b>Summa</b>	<b>50</b>							<b>7,6</b>	<b>11,1</b>	<b>23,6</b>	<b>444</b>

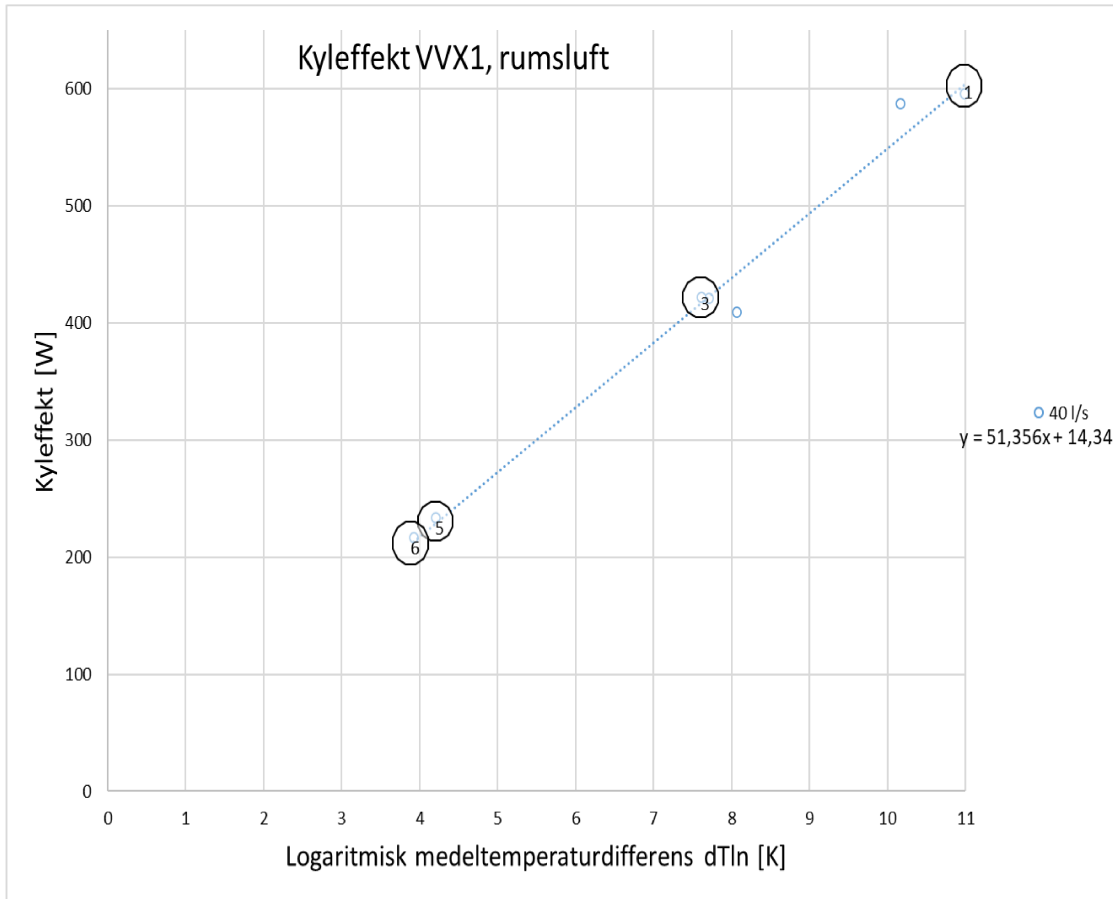


Diagram 6. Avgiven kyleffekt VVX1 för RL. Sifferindex i graf anger driftfall enligt tabell 3.

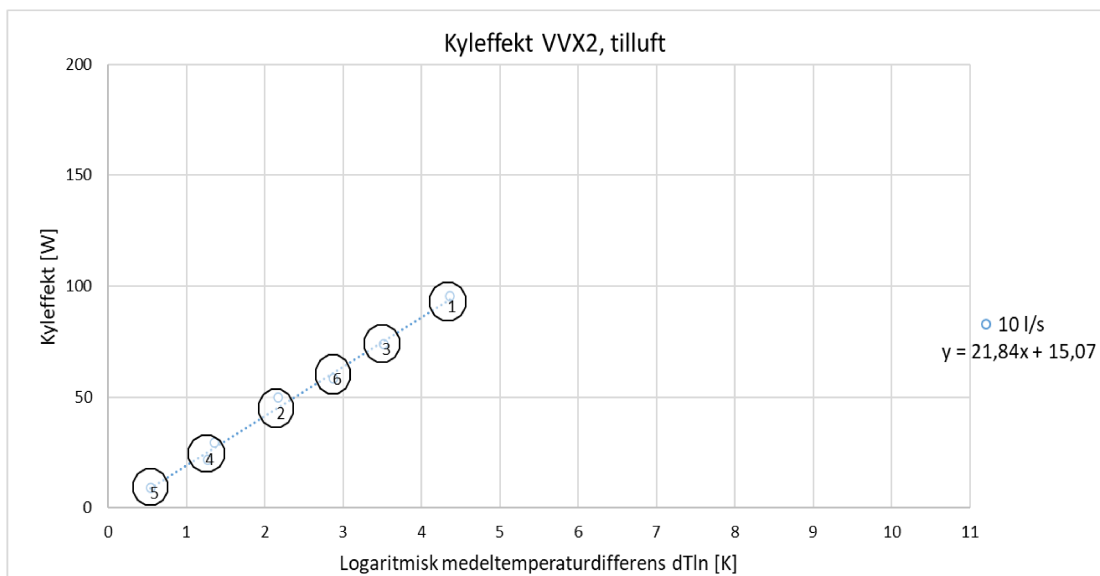


Diagram 7. Avgiven kyleffekt VVX2 för 10 l/s TL. Sifferindex i graf anger driftfall enligt tabell 3.

Resultatet visar att ett omvänt samband för kyl drift än i värmedrift:  $dT_{ln}$  för VVX2 är mycket mindre än för VVX1. Det förklaras av att TL (uteluften) håller en temperatur som ligger närmare VB2s temperatur. Eftersom VVX2 i mätningarna fick mindre  $dT_{ln}$  i kyl drift än i värmedrift, så stod VVX2 för en relativt liten del av prototypens kyleffekt.

I likhet med värmedriften, så blir VVX2 effektivare ju större temperaturskillnad det är, dvs ju varmare det är ute, dess högre kyleffekt via tilluften. Eftersom endast ca 5-20% av kyleffekten distribueras via VVX1, och eftersom temperaturdifferensen mellan RL och VVX1 är ett fåtal grader, blir den påtvingade konvektionen i VVX1 avgörande för den totala kyleffekten.

Förutsättningen för att kunna använda befintliga rör och nya konvektorer till frikyla är att det inte bildas kondens. Dimensionerande daggpunkt är ca 10 g fukt/kg luft (motsvarar 55% RH vid 27 °C) och ger kondens vid ca 14 °C. Så hög fukthalt är ovanlig. Vid normalt sommarklimat kan ytan vara 10 °C, utan kondens. Tabell 3 visar data för frikyla med köldbärare 15 °C respektive 12 °C. Med rumstemperatur 25 °C blir kyleffekten ungefär i paritet med instrålning genom fönster på 2 m<sup>2</sup> med solen i 90° vinkel (solnedgång). På dagen blir instrålningen mindre. Därmed räcker sannolikt kyleffekten för att hålla ca 25 °C i lägenheterna.

### **Potential på systemnivå**

En av grundpelarna i konceptet är att relativt enkla ingrepp i lägenheterna skall ge fördelar på systemnivå, utan att man gör åverkan på systemet utanför lägenheterna (så som rörstammar). Dock är det viktigt att följa upp vämpumpens drift, med tanke på att effektkapaciteten ökar med gynnsammare temperaturer (mindre temperaturlyft). Det kan resultera i oönskade frekventa start- och stoppintervaller, vilket kan inverka mycket negativt på verkningsgraden. Även anslutningar till en ackumulatortank kan ge kortslutning av temperaturerna mellan tillopp och retur, vilket kan inverka negativt på energieffektiviteten.



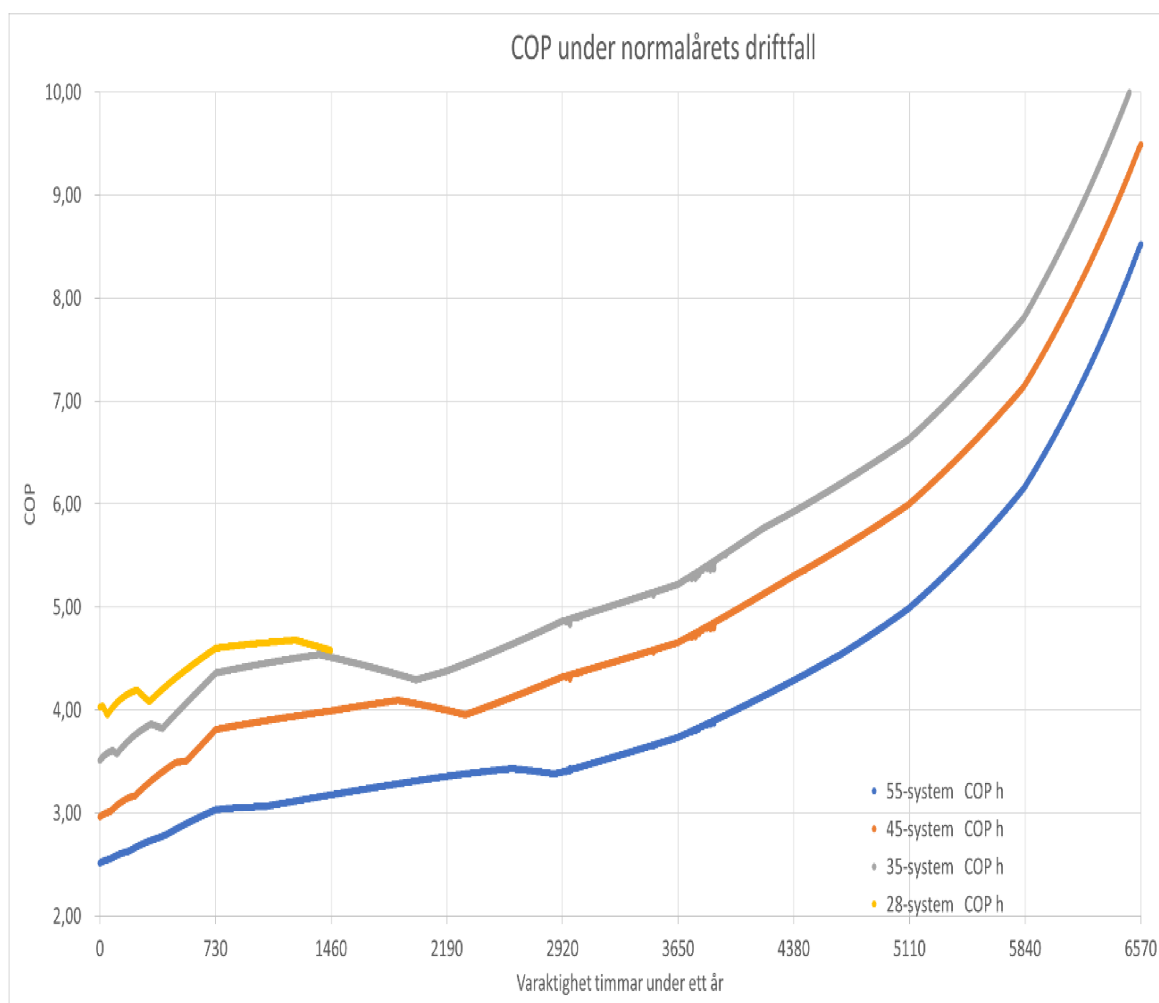


### *Energibesparing värmedrift, värmepumpar*

Vilken temperatur som blir dimensionerande för lågtemperaturkonvektorn beror på vilken temperatur de dimensionerats för, dvs hur stor dess värmeavgivande yta är. För att kunna avge värmebärarens värme via rumsluftvärmaren, erfordras minst några grader varmare än rumstemperaturen. Med 21 °C i rummet (RL) är det möjligt med tex dimensionerande 28 °C på VB1, men då blir lågtemperaturkonvektorn större än konventionella konvektorer. Med 35 °C dimensionerande framledningstemperatur blir lågtemperaturkonvektorn i sin helhet ungefär lika stor som en konventionell konvektor för 55/45 °C.

Om varmluften värmer väggar och tak etc, bidrar strålningen från dessa ytor positivt till den operativa temperaturen. På en yta av 10 m<sup>2</sup> ger 5 K temperaturökning ca 200 W ökad värmestrålning.

Värmepumparnas verkningsgrad (COP) beror i hög grad av kondenserings- och förångnings-temperaturen. Enligt diagram 8 varierar dessa under året (årstider och i viss mån med tid på dygnet pga värmesystemets och bergets variationer i temperatur).



*Diagram 8. Värmesystemens temperatur på VB1 inverkar på kondenserings-temperaturen, vilket i sin tur inverkar på värmepumparnas COP. Fyra olika*

systemtemperaturer visas i diagrammet. Endast värmesäsongens 6570 timmar av årets 8760 timmar visas i diagrammet.

Störst elbesparing uppnås då värmeeffektbehovet är som störst, dvs årets kallaste timmar. Det förklaras av att systemtemperaturerna då är som högst och COP som lägst. Högt värmeeffektbehov och lågt COP sammanfaller alltså. En sänkning av systemtemperaturen och därmed ökat COP ger därmed störst energibesparing under årets kallaste timmar. Tabell 4 visar att de kallaste timmarna under värmesäsongen står för den största energibesparingen. Ju lägre systemtemperatur, dess starkare blir detta samband. Vid sänkning av systemtemperaturen, står den kallaste månaden för ca 30% av elbesparingen. Ju större sänkning, dess större andel. Mellan 28- och 35-systemet är det stor skillnad under den kallaste månaden, men på årsbasis är skillnaden relativt liten. 28-systemet motiveras därmed främst av marginalelens effekttaxor och miljöpåverkan. Tabell 4 visar en beräkning för fastighet med dimensionerande värmebehov på 110 kW och 234000 kWh/år.

Tabell 4. Beräkning av optimeringspotential med lågtemperaturssystem

Varaktighet timmar	Varaktighet månader	55-system kWh el	45-system kWh el	35-system kWh el	28-system kWh el	45-system	35-system	28-system	45-system	35-system	28-system
						Besparing kWh el	Besparing kWh el	Besparing kWh el	Andel av årlig besparing	Andel av årlig besparing	andel av årlig besparing
730	1	19 816	16 422	14 114	12 861	3 393	5 702	6 954	26%	29%	33%
1460	2	13 117	10 379	9 085	8 734	2 738	4 032	4 384	21%	20%	21%
2190	3	10 789	8 709	8 025	8 025	2 080	2 764	2 764	16%	14%	13%
2920	4	8 861	7 345	6 544	6 544	1 515	2 317	2 317	12%	12%	11%
3650	5	6 952	5 520	4 913	4 913	1 432	2 039	2 039	11%	10%	10%
4380	6	4 790	3 856	3 435	3 435	934	1 355	1 355	7%	7%	6%
5110	7	3 059	2 502	2 250	2 250	557	809	809	4%	4%	4%
5840	8	1 726	1 458	1 325	1 325	268	401	401	2%	2%	2%
6570	9	743	651	597	597	92	146	146	1%	1%	1%
7300	10	150				150	150	150	1%	1%	1%
8030	11	-				-	-	-	0%	0%	0%
8760	12					-	-	-	0%	0%	0%
Summa		70 003	56 842	50 289	48 685	13 161	19 714	21 318	100%	100%	100%
Differens		100%	81%	72%	70%	19%	28%	30%			

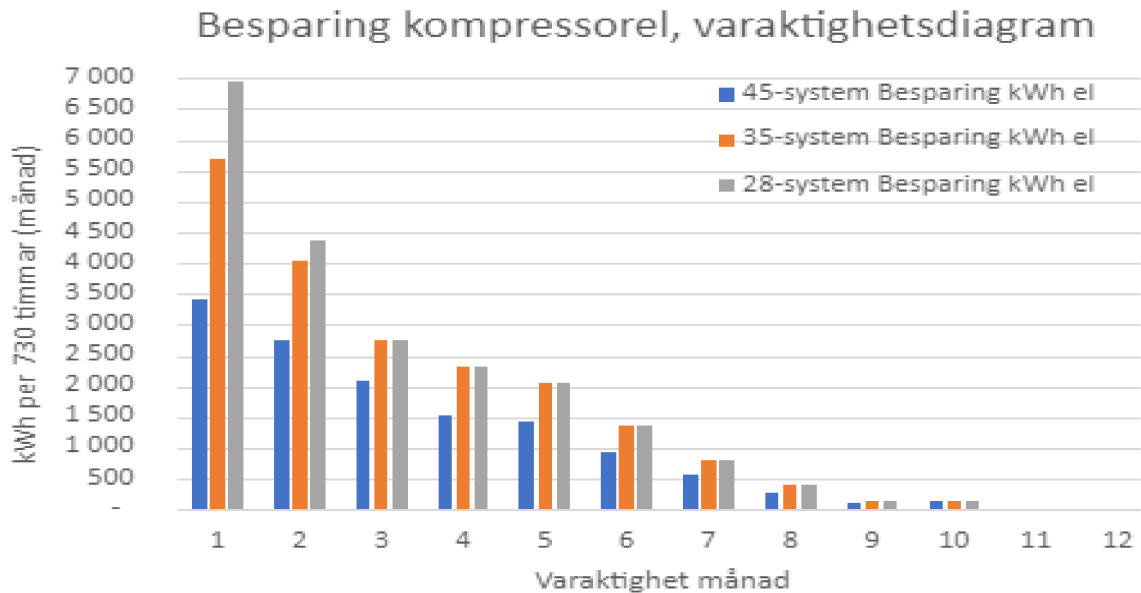


Diagram 9. Stapeldiagram visar fördelningen av värmepumparnas sparade kompressor-el, enligt tabell 4. Månad 1 utgör den kallaste månaden och uppvisar störst elbesparing.

Varaktighetsmånaden i tabell 4 med störst energianvändning under året står för ca 30% av den totala energibesparingen. Tabell 4 visar att det ger stort utslag i energibesparingen genom att sänka dimensionerande temperatur från 55 °C till 45 °C respektive 35°C. Däremot ger sänkningen till dimensionerande 28 °C endast 2% mer årlig energibesparing än 35-systemet. Ett 28-system ger däremot stort utslag ur effektperspektiv, dvs då energipriser är höga och miljöbelastande.

#### Kostnadsbesparing och pay-off värmedrift, värmepumpar

Den reella kostanden för olika månader skiljer sig ganska lite, eftersom avgifter, skatter, moms etc utgör en mycket större andel än spotpriset på el. I beräkningarna har elpriset för bostadsrättsföreningar antagits vara 2 kr/kWh. Se diagram 10.

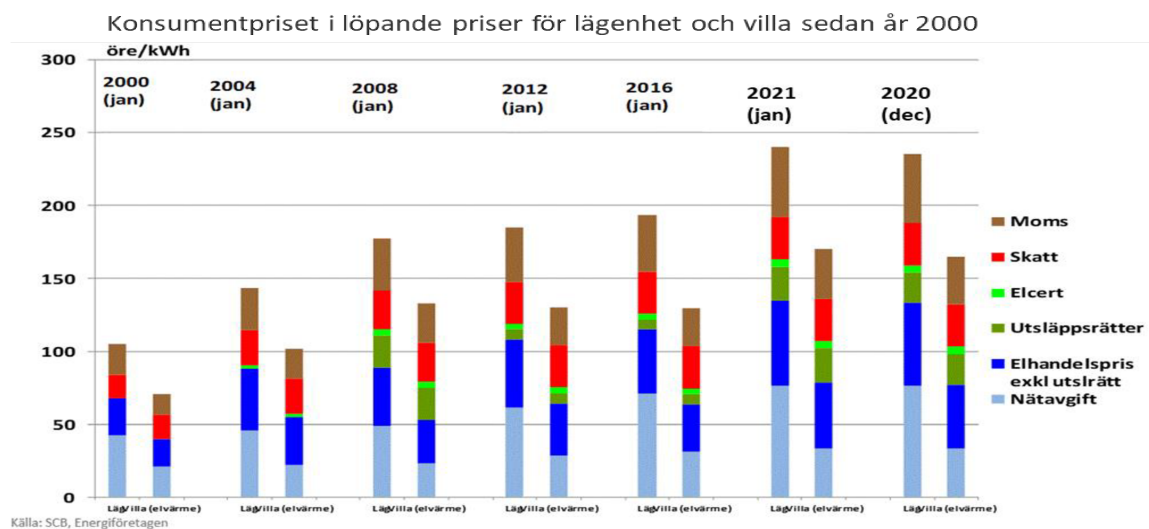


Diagram 10. Löpande elpris för villa och lägenhet. Källa Energiföretagen [3].

Entreprenadkostnaden för att byta ut befintliga radiatorer/konvektorer beräknas utifrån antaganden:

- En konvektor per rum,
- Respektive lägenhet på 100 m<sup>2</sup> har fyra konvektorer
- 2000 kr per ny konvektor: 8000 kr/lägenhet
- Arbete och material för att demontera befintlig och montera ny konvektor: 12 000 kr/lägenhet (för ett flerbostadshus med ca 50 lägenheter).
- Energianvändning till värme: 100 kWh/m<sup>2</sup>, år.

Med elenergianvändning i förhållande till värmeenergi, enligt resultat från tabell 4, blir besparing avseende el till värmepump i fastigheten:

Tabell 5. Beräkning av pay-off tid

	Värme	55-system	45-system	35-system	28-system
Behov kWh/år per lägenhet	10 000	2 992	2 429	2 149	2 081
Differens kWh/år per lägenhet			- 562	- 843	- 911
Besparing kr/år per lägenhet			- 1 125	- 1 685	- 1 822
Pay-off tid, år			18	12	11

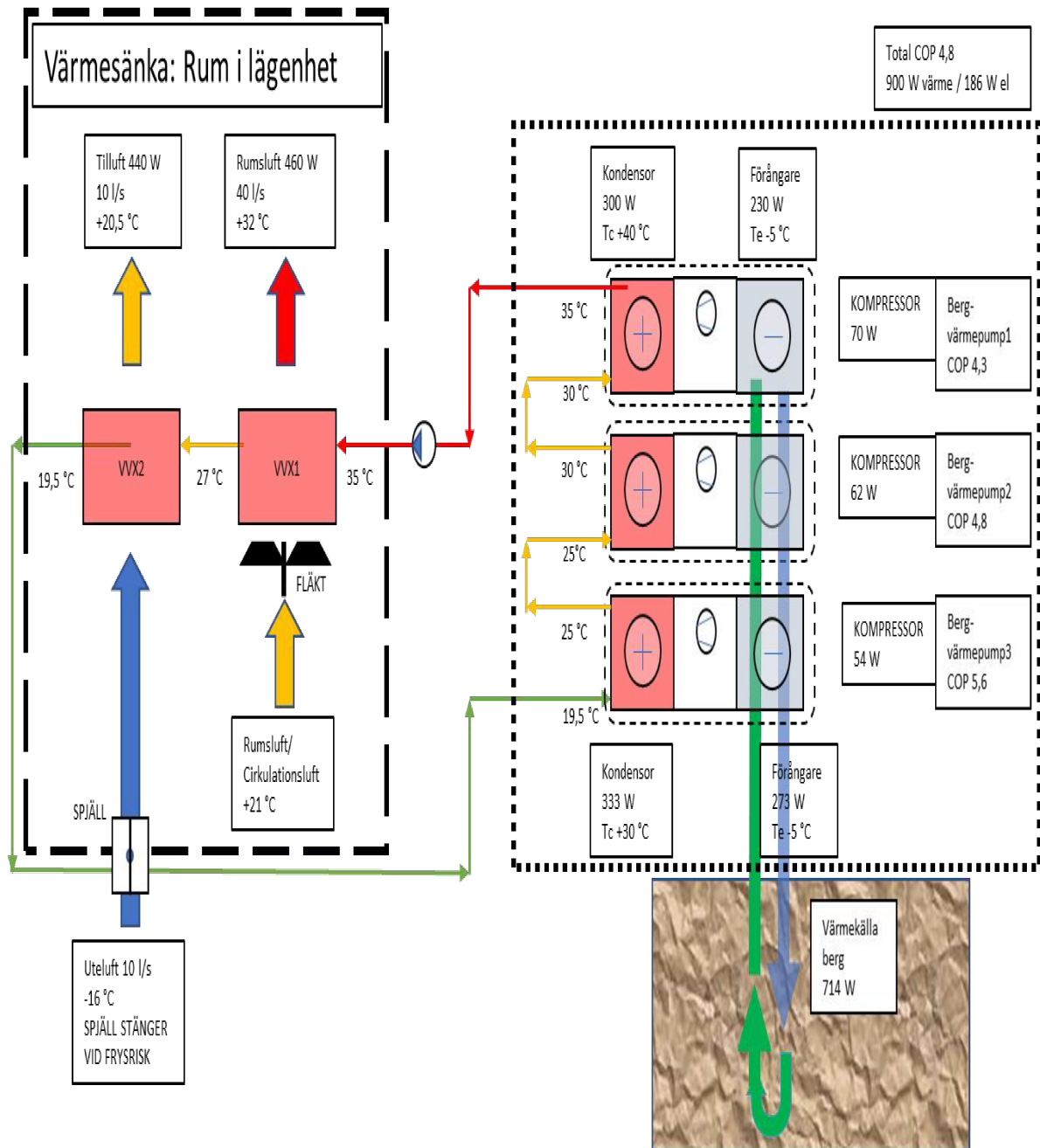
Ca 12 års pay-off tid anses generellt vara för lång tid för att vara attraktivt att genomföra för bostadsrättsföreningar. Därmed blir det avgörande hur mycket man värderar funktionen med frikyla, som man får på köpet. Om energirenoeringen kostar 20 000 kr/lägenhet och kylinstallationen värderas till 20 000 kr/lägenhet, så är energirenoeringen avskriven från dag ett. I dialog med BRF i Electricity framkom vikten av bra inomhuskomfort och möjlighet till frikyla. Detta kan uppväga den långa pay-offtiden. Tillfrågade BRF med stora fönster har erfart höga temperaturer vid solinstrålning (över 30 °C under långa perioder dygnet runt, toppar över 40 °C i söderläge). Entreprenadkostnaden för att installera AC är högre än för att konvertera till frikyla/lågtemperatur-konvektorsystem. Samarbetspartnern Electricity i Hammarby sjöstad observerade ett mycket stort behov och intresse för frikyla.

Driftkostnaden för frikyla är låg, då elanvändningen endast utgörs av cirkulationspumpens arbete. En annan fördel med lågtemperaturkonvektorn är att kallras p.g.a. stora fönster sannolikt kan avhjälpas med det varma luftflödet.

### Seriekopplade värmepumpar

Värmepumpar på marknaden är i regel dimensionerade för en temperaturökning på värmebäraren genom kondensorn på ca 5 K. Därmed blir framlednings-temperaturen avgörande för vilken kondenseringstemperatur som kan hållas,

vilket direkt inverkar på COP. En lösning som tillvaratar möjligheten med en låg returtemperatur är seriekopplade kondensatorer, där var och en höjer temperaturen med ca 5 K. Den låga returtemperaturen kan därmed förvärmas i den första värmepumpen i seriekopplingen, vilket möjliggör lägre kondenseringstemperatur i den, och därefter samma princip för nästkommande värmepump i seriekopplingen. Med 15 K lägre returtemperatur än tilloppstemperatur kan tex tre VP lyfta 5 K vardera, se figur 3. Medel-temperaturen för kondensatorerna blir då ca 7,5 K lägre än med parallell-kopplade VP. Det totala COP ökar och kompressorelen minskar med ytterligare ca 12%, beroende på driftfall.



Figur 3. Principschema för värmesystem i fastighet, med borrhål och värmepump som värmekälla

## **Fjärrvärme**

Fjärrvärme har ofta taxan utformad där energi- och abonnemangskostnaden påverkas av returtemperaturen, eftersom en hög temperatur påverkar rökgaskondenseringens verkningsgrad negativt. I synnerhet vid toppeffekter inverkar rökgaskondenseringen direkt på marginalenergin, som normalt utgörs av olja och gas. Olja och gas är dyr och har stor miljöpåverkan.

Konvektorprototypens avkylning är, tack vare seriekopplingen mot tilluft, effektivast då utetemperaturen är kall. Detta sänker returtemperaturen vid fjärrvärmens topplast, vilket minskar andelen fossila bränslen i fjärrvärmemixen.

## **Lågt flöde och stabil reglering**

Pga. väsentligt lägre tryckfall i rörledningar (pga större  $dT$ ) kan cirkulationspumpen minska elanvändningen med ca 75%.

Med föreslaget lågtemperatursystem kan ett konstant och lågt flöde hållas (beroende av styrning), vilket underlättar stabil reglering under de olika årstiderna. Det möjliggör reglering av rumstemperaturen i varje lägenhet, i stället för att höja hela husets tilloppstemperatur. Generellt uppnås ca 30% lägre energianvändning, pga minskade övertemperaturer, med en välfungerande injustering [4].

## Diskussion

I princip alla tillämpningar med termiska energisystem påverkas verkningsgraden och förluster av systemtemperaturen. En mycket stor utmaning inom en snar framtid blir omställningen av energisystemet i Sverige och EU, då fossil energi skall fasa ut och ersättas av förnybar.

Dels måste energianvändningen minska, vilket bland annat kan uppnås genom att använda lågvärdig termisk energi, så som ”spillvärme” och ”frikyla”. En av de största utmaningarna för det är det befintliga beståndet av fastigheter, vars värmesystem inte är anpassat för låga temperaturer. Flerbostadshus har mycket sällan central kyla installerad, där frikyla kan avsättas. För detta fastighetsbestånd blir det därmed avgörande att med minimalt byggstök och minimala kostnader konvertera fastigheternas termiska energisystem. Det möjliggör bland annat satsningar på infrastrukturnivå, med femte generationens termiska nät, där bla överskottsvärme distribueras emellan fastigheter.

Dessutom är det mint lika viktigt att hantera en mer volatil effekt, i avsaknad av svänghjulskapacitet med större andel förnybar energi i el-nätet. Därmed har brukarsidan en viktig funktion: att anpassa elanvändningen efter tillgången på effekt. Lågtemperaturkonvektorn blir som effektivast då det är som kallast ute, och dämpar därmed eleffekten till värmepumpar. Effektdämpningen sammanfaller således med när belastningen i elnätet traditionellt är som störst.

I många termiska nät inom EU utgör fossil energi med råge den största andelen av mixen, ofta över 90%. Möjligheten att avsätta spillvärme i systemen begränsas av systemtemperaturen. För att kunna avsätta spillvärmens genom att tillföra värme, måste fjärrvärmens returtemperatur vara lägre än spillvärmens. Kapacitetsproblem i termiska nät inom EU medför att framledningstemperaturen ofta behöver vara så pass hög så att temperaturdifferensen mellan tillopp- och returledningen medger tillräckligt lågt flöde. En hög framledningstemperatur ger generellt även en hög returtemperatur från fastigheternas värmesystem, vilket utgör ett hinder för att avsätta spillvärme eller annan lågvärdig värme. Värmesystemens värmeavgivande förmåga och därmed returtemperatur, beror på hur de är dimensionerade. En potential med att installera lågtemperaturkonvektorer i stora fastighetsbestånd är att både framledningstemperaturen och returtemperaturen kan sänkas.

Värmeeffekten påverkas markant av uteluftens temperatur, vilket innebär att värmen från lågtempererad värmebärare avges effektivast när det är som kallast ute, vilket sammanfaller med effekttoppar i fjärrvärme- och elnät. Eftersom temperaturdifferensen blir större än med konventionella konvektorer, kan därmed effekten distribueras med lägre flöde i det termiska nätet efter konverteringen.

Resultaten från mätningar på prototypen visar att lågtemperaturkonvektorn kan få ut lika hög värmeeffekt som en konventionell radiator i samma storlek. En frontplåt kan göra att lägenhetsinnehavaren inte ser skillnad på den nya typen av seriekopplad lågtemperaturkonvektor och en konventionell radiator.

Ur systemperspektiv för energioptimering är maximal värmeavgivning en fördel. Den lägre returtemperaturen som uppnås är främst en fördel för termiska nät, pga



ökad kondensvärmeåtervinning. Även möjligheten att avsätta lågtempererad värme är en fördel för alla energisystem, inte minst för 5e generationens lågtempererade termiska nät och för seriekopplade värmepumpar.

Kompressorernas driftfall påverkar i hög grad dess verkningsgrad, och därmed COP för värmepumpen. Det ger utslag i tydliga COP-dippar i diagram 8. Ju mindre temperaturlyftet blir, dess högre kapacitet för respektive kompressor, vilket ger färre kapacitetssteg. För 55-systemet inträffar det vid timvärde 2870 och vid 1380 för 35-systemet. Dippen i COP-värde blir större ju lägre systemtemperaturen är, vilket beror på färre kapacitetssteg. Innebörden är att en befintlig värmepump blir känsligare för driftfallet, eftersom kapacitetsregleringen försämras. Detta kan dock enkelt kompenseras med en större ackumulatortank. En fastighet med 100 kW topp effekt och lägsta kapacitetssteg på 10 kW behöver ca 5 kWh termisk ackumulering för god kapacitetsreglering. Det motsvarar 10 K för en vattenvolym på ca 700 l. 20 K fördubblar den termiska ackumuleringen. Med de ökande dT i värmesystemet kompenseras därmed troligen det ökade behovet av termisk ackumulering. Ofta räcker den termiska trögheten i värmesystemet, om det har långa rördragningar och stor volym värmebärare. En tumregel är att så länge VP inte har fler än ca fyra start och stopp per timme, så uppnås acceptabel kapacitetsreglering.

COP-värden i diagram 8 är realistiska under förutsättning att värmepumpen är optimerad för systemet i samtliga driftfall, gällande kapacitetsreglering och temperaturer. Däremot är det ovanligt med så pass optimerade värmepumpanläggningar, och med så små temperaturlyft, vilket medför att det är ovanligt med så höga COP-värden.

Eftersom COP beror av temperaturlyft samt kapacitetsregleringen, så är det av stor betydelse för energianvändningen att hålla så låg framledningstemperatur som möjligt vid hög effekt. Vid medeleffekt finns risk för undermålig kapacitetsreglering vilket kan sänka COP så pass mycket att det tar ut energivinsten med fördelaktigare temperatur. Därför bör entreprenaden även kontrollera erforderlig termisk ackumulering för att uppnå god kapacitetsreglering.

## Referenser, källor

[1] Rolfsman et.al. SP Rapport 2010:50. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut  
Nästa generations klimatkyla i bostäder och lokaler

[2] Högskolan Dalarna. (2000). LÅGTEMPERATURVÄRMESYSTEM -En  
kunskapsöversikt. EKOS PUBLIKATION 2000:4

[3] [www.energiforetagen.se/pressrum/nyheter/2019/mars/energiforetagen-fortydligar-om-elnetens-kostnader/](http://www.energiforetagen.se/pressrum/nyheter/2019/mars/energiforetagen-fortydligar-om-elnetens-kostnader/)

[4] Svensk Fjärrvärme (2003). LÅNGTIDSEGENSKAPER HOS  
LÅGFLÖDESINJUSTERADE RADIATORSYSTEM. FOU 2003:88

[5] SVENSKA FJÄRRVÄRMEFÖRENINGEN. (2000) AVKYLNINGEN I ETT  
FJÄRRVÄRMESYSTEM DEL 2. FVF 2000:03.

## Bilagor

- *Administrativ bilaga (se mall) (OBLIGATORISK)*

[Klicka här och skriv]