

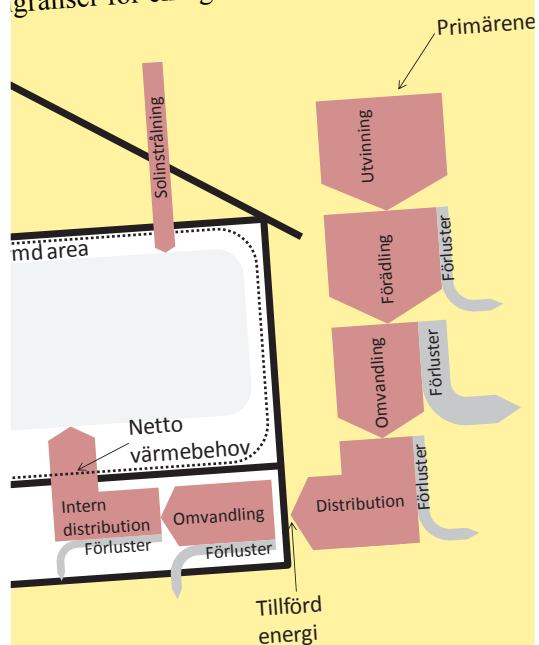
TEMPERATUREFFEKTIVA FJÄRRVÄRMESYSTEM

RAPPORT 2012:2

y)¹⁴ har definierat primärenergi som:
es (e.g. coal, crude oil, sunlight,
anthropogenic conversion or

t.ex. kol, råolja, solljus, uran) som inte
vandling")

sgnads energianvändning är beroende på hur
lig energifaktura säger inget om den energi
t.ex. utvinning, förädling och distribution.
däremot energianvändningen i hela
ndningen fås genom att den köpta energin
or (PEF) för den aktuella energibäraren. Se
gränser för energianvändningen i en byggnad



er för primärenergi.
gy system boundaries.

primärenergi-begreppet definierat och
för fjorton olika energibärare baserat på euro

EFFEKTIVISERING AV FJÄRRVÄRMEANSLUTNA BYGGNADER

PER-OLOF JOHANSSON

FÖLJANDE RAPPORT UTGÖR EN SVENSK VERSION AV
DOKTORSAVHANDLINGEN

BUILDINGS AND DISTRICT HEATING
- CONTRIBUTIONS TO DEVELOPMENT AND ASSESSMENTS OF EFFICIENT
TECHNOLOGY

AVDELNINGEN FÖR ENERGIHUSHÅLLNING
INSTITUTIONEN FÖR ENERGIVETENSKAPER
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

LUNDS UNIVERSITET

2011

ENGELSK ORIGINALVERSION AV AVHANDLINGEN FINNS TILLGÄNGLIG PÅ
<http://www.ees.energy.lth.se/publikationer>

ISBN 978-91-7381-083-8

© 2012 Svensk Fjärrvärme AB

FÖRORD

Här beskrivs olika sätt att förbättra energiprestanda i fjärrvärmesystemet.

Per-Olof Johansson har bland annat undersökt olika möjligheter att sänka primärtemperaturen genom bättre avkylning. Han visar också hur man kan säkra leveransen även då byggnadens elförsörjning har fallit bort. Här finns också ett avsnitt som visar hur man genom att utnyttja alternativa kopplingsprinciper kan förbättra energiutbytet på befintliga konvektorer.

Arbete har utförts av doktorand Per-Olof Johansson och handledare Svend Fredriksen, Lunds Tekniska Högskola. Till projektet har en referensgrupp bestående av representanter från Svensk Fjärrvärmes tekniskråd deltagit.

Projektet ingår i forskningsprogrammet Fjärrsyn som finansieras av Energimyndigheten och fjärrvärmebranschen. Fjärrsyn ska stärka möjligheterna för fjärrvärme och fjärrkyla genom ökad kunskap om fjärrvärmens roll i klimatarbetet och för det hållbara samhället till exempel genom att bana väg för affärsmässiga lösningar och framtidens teknik.

Bo Johansson
Ordförande i Svensk Fjärrvärmes tekniskråd

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Svensk Fjärrvärme eller Fjärrsyns styrelse har tagit ställning till innehållet.

SAMMANFATTNING

Syftet med denna avhandling är att bidra till förbättrad energiprestanda av fjärrvärmesystem genom att fokusera på tre områden.

1. Undersöka tre metoder för att sänka primära fjärrvärmemetemperaturer och kvantifiera nyttan av detta med så kallade primärenergifaktorer.
2. Undersöka till vilken utsträckning en fjärrvärmeansluten byggnad kan ta emot värme under ett elavbrott
3. Experimentellt undersöka styrventilers kavitationsbenägenhet i syfte att fastställa varför kavitation inte anses som ett problem i fjärrvärmesammanhang.

Det tre metoderna under punkt 1 har varit:

- a) Utvärdering av olika kopplingsprinciper på fjärrvärmecentralen för ökad primär avkylning. I jämförelsen ingår en variation av tappvarmvattenlastens storlek och av temperaturprogram för uppvärmning.
- b) Implementera radiatorfläktar på befintliga radiatorer för att öka den konvektiva värmeövergången och därmed möjliggöra en sänkning av temperaturen i värmesystemet. Detta medför även en primärtemperatursänkning.
- c) Påvisa nyttan med att styra ett värmesystem så att lägsta möjliga primära returtemperatur uppnås vid varje värmelast. Detta ligger delvis till grund för en implementering av adaptiv reglering av värmesystemet.

Inom ramen för punkt 1 har nyttan av implementering av radiatorfläktar och optimerad radiatorstyrning kvantifierats med primärenergifaktorer för fjärrvärme.

Beräkning av primärenergifaktorer finns angivet i EU standarder och användning av faktorerna förespråkas i ett relativt nyttillkommet EU direktiv angående energideklarering av byggnader. Här är kvantifieringen av primärenergifaktorerna exemplifierad för ett fjärrvärmesystem med kraftvärme och en värmepanna.

Resultatet av analysen visar att beroende på vilken typ av el den kraftvärmeproducerade elen allokeras med har en stor inverkan på primärenergifaktorn för fjärrvärme.

Gällande punkt 2, fjärrvärme vid elavbrott, visar resultaten från studien att en betydande andel värme kan mottas av byggnaden trots avsaknad av fungerande cirkulationspump. Detta beror på att det i fastigheten uppstår naturlig cirkulation i radiatorsystemet. Generellt kan det sägas att 20-80% av ursprunglig värme kan levereras även utan elektricitet om primärflödet i fjärrvärmenätet kan upprätthållas. I arbetet har även hinder för självcirkulation i byggnader, vilka minskar eller omöjliggör möjligheten för självcirkulation identifierats.

Under punkt 3 har en mindre experimentell studie av kavitationsbenägenhet för styrventiler genomförts. Det visade sig att kavitation kan uppkomma för ventilerna i fjärrvärmesammanhang. Dock uppstår kavitation främst då ventilerna har stor öppningsgrad, vilket kan förklara varför kavitation inte upplevs som ett stort problem i fjärrvärmebranschen, trots att överdimensionerade styrventiler är vanligt förekommande.

SUMMARY

The objective of this thesis is to contribute to improved performance of district heating systems by focusing on three items.

- Item 1:** Study of methods of improving the performance of sub-systems within buildings connected to the distribution network. The three methods can be considered more or less innovative. Results from two of these measures are quantified in terms of so-called Primary Energy Factors,
- Item 2:** Investigation of to which extent space heating supply to buildings connected to a district heating network can be maintained in the event of a failure in the supply of electric power,
- Item 3:** An experimental investigation of cavitation phenomena within primary side substation control valves.

More specifically, concerning item 1, three methods were investigated;

- a) Deriving substation connection schemes that will improve an overall thermodynamic efficiency, taking into account a complete range of load cases, including large variations in hot water load,
- b) Adding small fan blowers onto surfaces of existing radiators, with the aim of increasing convective heat transfer, thereby making it possible to lower the operating temperatures of the hydronic space heating system such that supply and return temperatures on the primary side of substations can be lowered,
- c) Advanced control of hydronic space heating systems such that at all heat loads an operational mode is selected automatically that will optimise performance of a substation in terms of lowest possible return temperature on the primary side.

The thesis exemplifies how Primary Energy Factors for district heating are affected in the case of heat being supplied from a district heating system in which heat is produced in a combined heat and power plant and in a heat-only boiler. Calculations of the Factors were performed according to an EU standard, EN 15603:2008. The results of the analysis show that the size of the factor depends strongly upon the particular production mix of the electric power system to which the combined heat and power plant is assumed to be connected.

Concerning item 2, district heating in case of power failure, both numerical analysis and field experiments showed that a significant share of the heat supply to buildings can be maintained in the event of a circulation pump no longer running. This is due to the fact that gravity driven circulation takes over in particular when some minor modifications are made. Generally, 20-80% of the initial heat load can be supplied provided circulation is maintained in the district heating network.

Item 3 pertains to a small laboratory study of cavitation in modern state-of-the art control valves. It was found that cavitation primarily occurred under conditions that in practice occur rather seldom, such as a large differential pressure across the valve, combined with a situation when the valves are close to being fully opened.

ERKÄNNANDEN

Det är många som hjälpt till och bidragit med kunskap, idéer och värdefulla synpunkter under min tid som doktorand. Ett stort tack till er alla!

Särskilt tack till:

Min handledare Svend Frederiksen som gett mig möjligheten att bedriva mina forskarstudier.

Min biträdande handledare Janusz Wollerstrand för alla intressanta diskussioner och för att du delat med dig av ditt stora tekniska kunnande och intresse.

Projektledaren för projektet om fjärrvärme vid elavbrott, Lennart Lindsjö, och referensgruppen, Lennart Andersson, Jan Berglund, Conny Håkansson, Kurt Ericsson, Egon Lange och Jan-Peter Stål, för ert värdefulla stöd, och Anna Envall Lundberg, kommunikatör för projektet. Tack till Harald Andersson på E.ON som initierade projektet. Stort tack till all involverad driftspersonal som gjort fältförsök möjliga!

The Scientific Committee of the Nordic Energy Research Programme “Primary Energy Efficiency”, Rolf Ulseth (ordförande), Carl-Johan Fogelholm, Olafur Petur Palsson, Andres Siirde, och Lars Gullev, samt doktorandkollegorna Monica Berner, Thomas Kohl, Marta Ros Karlsdottir och Eduard Latosov, för stöd och intressanta seminarier.

Svensk Fjärrvärme AB, Energimyndigheten, Nordic Energy Research, E.ON Värme Sverige AB, Malmö Stad, Stadsfastigheter och MKB Fastighet AB för finansiering och stöd.

Samtliga kollegor vid vår institution och avdelning. Ett särskilt tack till Patrick Lauenburg för allt samarbete under årens lopp. Tack till Magnus Fast, Klas Jonshagen, Hedvig Paradis och Farhad D. Rad för fina stunder i kafferummet.

Samtliga deltagare i de olika referensgrupperna från Svensk Fjärrvärme AB. Ett särskilt tack till Conny Håkansson och hans företrädare Jan Berglund.

Min familj, allihopa!

PUBLIKATIONER I AVHANDLINGEN

Avhandlingen är baserad på följande artiklar som finns tillgängliga i den fullständiga avhandlingen. Avhandlingen finns tillgänglig för nedladdning på institutionens för energivetenskapen, LTH, hemsida (<http://www.ees.energy.lth.se/publikationer>).

- Artikel I** **Optimized space heating system operation with the aim of lowering the primary return temperature**
 Ljunggren, P., Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.
 Conference proceeding from the 11th International Symposium on District Heating and Cooling, 2008, Reykjavik, Iceland.
- Artikel II** **Obstacles for natural circulation in heating systems, connected to district heating via heat exchangers, during a power failure**
 Johansson, P.-O., Ljunggren, P., Wollerstrand, J.
 Conference proceeding from the 11th International Symposium on District Heating and Cooling, 2008, Reykjavik, Iceland.
- Artikel III** **Modelling Space Heating Systems Connected to District Heating in Case of Electric Power Failure**
 Johansson, P.-O., Ljunggren, P., Wollerstrand, J.
 Conference proceeding from the 48th Scandinavian Conference on Simulation and Modeling (SIMS 2007), 2007, Göteborg (Särö), Sweden.
- Artikel IV** **District heating in case of power failure**
 Lauenburg, P., Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.
 Applied Energy 87, p. 1176-1186, 2010
- Artikel V** **Improved cooling of district heating water in substations by using alternative connection schemes**
 Johansson, P.-O., Lauenburg, P., Wollerstrand, J.
 Conference proceedings from ECOS 2009 (22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems), Foz do Iguaçu, Brazil.
- Artikel VI** **Influence of district heating temperature level on a CHP station**
 Johansson, P.-O., Jonshagen, K., Genrup, M.
 Conference proceedings from ECOS 2009 (22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems), Foz do Iguaçu, Brazil.
- Artikel VII** **Improved temperature performance of radiator heating system connected to district heating by using add-on-fan blowers**
 Johansson, P.-O., Janusz Wollerstrand, J.
 Conference proceeding from the 12th International Symposium on District Heating and Cooling, 2010, Tallinn, Estonia.

Artikel VIII Heat Output from Space Heating Radiator with Add-on-fan Blowers

Johansson, P.-O., Janusz Wollerstrand, J.
 Conference proceeding from COMSOL – conference....., 2010, Paris, France.

Artikel IX The impact from building heating system improvements on the primary energy efficiency of a district heating system with cogeneration

Johansson, P.-O., Lauenburg, P., Wollerstrand, J.
 Submitted to ECOS 2011 (24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems), Abstract accepted, Novi Sad, Serbia.

Sammanfattning av rapport A

Kavitation i styrventiler

Johansson, P.-O., Wollerstrand J.
 Sammanfattning av rapporten “Kavitation i styrventiler - laboratorieundersökning”, P.-O. Johansson and J. Wollerstrand.
 Fullständig rapport är publicerad av Svensk fjärrvärme, rapport 2009:45, 2009

ÖVRIGA RELEVANTA PUBLIKATIONER AV FÖRFATTAREN

Consequences of improvements in domestic hot water circulation circuits – Field Studies

Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.

Conference proceeding from the 10th International Symposium on District Heating and Cooling, Hannover, Germany., 2006

District Heating Supplies in Case of Power Failure

Ljunggren, P., Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.

Conference proceedings from ECOS 2008 (21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems), Krakow, Poland, 2008.

Fjärrvärme vid elavbrott – slutrapport

Lauenburg, P., Johansson, P.-O.

Projektrapport, Avdelningen för energivetenskaper, Lund Universitet, LTH, 2008.

Fjärrvärmeanslutna byggnaders värme- och varmvattensystem- samverkan, komfort och sårbarhet

Johansson, P.-O.

Licentiatavhandling, Avdelningen för energivetenskaper, Lund Universitet, LTH, 2007.

Förändringar i tappvarmvattenanvändning vid införande av tappvarmvattencirkulation – fallstudie

Johansson, P.-O.

Projektrapport, Avdelningen för energivetenskaper, Lund Universitet, LTH, 2006.

Husinterna värmesystem

Johansson, P.-O. , Wollerstrand, J.

Rapport, FoU 2005:136, Svensk Fjärrvärme, 2005.

Kavitation i styrventiler

Johansson, P.-O. , Wollerstrand, J.

Rapport 2009:45, Svensk Fjärrvärme, 2009.

Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure

Lauenburg, P., Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.

Conference proceedings from Building Simulation 2009 (11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition), Glasgow, UK., 2009

Optimal reglering av radiatorsystem

Wollerstrand, J., Ljunggren, P., Johansson, P.-O.

Rapport 2007:6, Svensk Fjärrvärme, 2007.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	12
1.1	AVHANDLINGENS OMFATTNING	12
2	GRUNDLÄGGANDE FJÄRRVÄRMETEKNIK	14
2.1	FJÄRRVÄRMEANSLUTNA BYGGNADER	16
3	UTVÄRDERING AV ENERGIANVÄNDNING	18
3.1	PRIMÄRENERGI	19
3.2	FJÄRRVÄRME OCH PRIMÄRENERGIBEGREPPET	20
3.3	IMPLEMENTERING AV PRIMÄRENERGIBEGREPPET	23
4	METODER FÖR SÄNKTA FJÄRRVÄRMETEMPERATURER	25
4.1	RADIATORFLÄKTAR	28
4.2	KOPPLINGSPRINCIPER I FJÄRRVÄRMECENTRALER	31
4.2.1	Alternativa kopplingsprinciper	32
4.3	ALTERNATIV RADIATORSTYRNING	34
4.3.1	Optimerad radiatorstyrning	35
4.4	PRIMÄRTEMPERATURENS INVERKAN PÅ ETT KRAFTVÄRMEVERK	36
4.4.1	Fallstudie	37
4.5	PRIMÄRTEMPERATURPÅVERKAN PÅ PRIMÄRENERGIFAKTORER FÖR FJÄRRVÄRME	38
5	FJÄRRVÄRMENS TILLFÖRLITLIGHET	40
5.1	FJÄRRVÄRMENS ELBEROENDE	40
5.1.1	Självcirkulation i värmesystem vid elavbrott	41
6	AVSLUTANDE DISKUSSION	43
6.1	SÄNKTA PRIMÄRTEMPERATURER	43
6.2	PRIMÄRENERGIFAKTORER FÖR FJÄRRVÄRME	44
6.3	ELBEROENDE I FJÄRRVÄRMEVÄRMDA BYGGNADER	44
6.4	KAVITATION I STYRVENTILER	45
7	FÖRESLAGNA FORTSATTA STUDIER	46
7.1	RADIATORFLÄKTAR	46
7.2	OPTIMERAD RADIATORSTYRNING	47

1 INLEDNING

Fjärrvärme är idag en väletablerad teknik i många länder, däribland Sverige, och spelar där en viktig roll inom energiförsörjningen. I Sverige står fjärrvärme för drygt 80% av uppvärmningen av flerbostadshus, och för knappt 70% av byggnadskategorin lokaler¹. Totalt står fjärrvärme för 56% av den totala energin som används för uppvärmning i Sverige².

Fjärrvärme produceras centralt och distribueras till kunder genom nergrävda isolerade rör. Både produktion och distribution av fjärrvärme gynnas av en god avkylning i anslutna kundernas fjärrvärmecentraler och en låg primär framlednings temperatur. De primära temperaturerna är beroende på vilka temperaturer som används i de anslutna byggnadernas värme- och varmvattensystem. Därför är det viktigt att sänka de temperaturer som behövs för byggnadsuppvärmning då dessa, under uppvärmningssäsongen, lägger grunden för de primära fjärrvärmemetemperaturerna.

Fjärrvärme möjliggör utnyttjande av bränslen och spillvärme som annars skulle vara svåra att använda på ett effektivt sätt i energisystemet. Genom samtidig produktion av värme och el i kraftvärmeverk bidrar fjärrvärmerna till att möjliggöra för en ökad förnybar elproduktion med en hög totalverkningsgrad. Att utvärdera olika energisystems effektivitet och kunna jämföra dem med varandra är ett komplicerat men viktigt arbete. I det relativt nyligen tillkomna EU direktivet³ angående energideklarering av byggnader anges att utnyttjande av primärenergifaktorer skall användas för en sådan jämförelse.

Även om fjärrvärme generellt betraktas som en tillförlitlig och robust uppvärmningskälla har de senaste årens oväder, och framförallt elavbrott i samband med stormen Gudrun 2005, ökat fokuseringen på en trygg värmeförsörjning i Sverige.

1.1 Avhandlingens omfattning

Denna avhandling fokuserar på tre områden relevanta för fjärrvärmeforskning, av vilka de två mest centrala är:

- Minskning av primärtemperaturer och exemplifiering av dess nytta i termer av primärenergifaktorer.
- Värmeförsörjning i fjärrvärmeanslutna byggnader vid elavbrott.

Utöver dessa två områden är även en experimentell studie av kavitation i styrventiler utförd.

Inom ramen för det första området har tre metoder för att sänka fjärrvärmetemperaturer undersökts. Nyttan av de sänkta temperaturerna har exemplifierats genom beräkningar av primärtemperaturer för fjärrvärme för ett fjärrvärmesystem med kraftvärmeproduktion (CHP) och en värmepanna för bas- och spetsproduktion.

¹ Energimyndigheten, Energy in Sweden 2010, 2010

² Energimyndigheten, 2009

³ The European parliament and the council of the European union, Directive 2010/31/EU, 2010

De tre undersökta metoderna för att sänka primärtemperaturerna är; montering av radiatorfläkt på befintliga radiatorer för ökad värmeavgivning, optimal radiatorstyrning och alternativa kopplingsprinciper av fjärrvärmecentraler.

Det andra syftet är att undersöka fjärrvärmeanslutna byggnaders förmåga att ta emot värme vid ett elavbrott. Denna del av arbetet har till stor del utförts genom fältexperiment i vilka eltillförseln till pumpar och reglerutrustning har stängts av.

Studien av kavitation i styrventiler har utförts experimentellt för ett begränsat antal styrventiler. Enlig specifikationer från ventiltillverkare borde kavitation förekomma i fjärrvärmeapplikationer. Trots detta anses generellt inte kavitation i styrventiler som något större problem inom fjärrvärmebranschen. Syftet med den experimentella studien av kavitation var att identifiera under vilka förutsättningar som kavitation i styrventiler kan uppstå.

De studerade metoderna för att minska primärtemperaturer är alla särskilt lämpade för implementering i befintlig bebyggelse. Vid nybyggnation finns ett större uppslag av metoder för att åstadkomma lågtemperatursystem för uppvärmning. Exempel på sådana system är lågtemperaturradiatorer och golvvärme. Denna typ av uppvärmningssystem är inte undersökta inom ramen för detta arbete som är begränsat till värmesystem med radiatorer, det vill säga att värmesystem med fläktkonvektorer (fan-coils) och luftbatterier, eller kombinationer av dessa, inte är undersökta.

Avhandlingen är även begränsad till att fokusera på indirekt fjärrvärmeanslutning, det vill säga att byggnadernas värmesystem är separerad från fjärrvärmenätet via värmeväxlare. Detta även om metoderna för att sänka primärtemperaturer naturligtvis kan vara till gagn även vid direktanslutning. Någon ekonomisk utvärdering är inte heller utförd. Arbetet i avhandlingen är baserat på teknik relevant för svenska förhållanden.

Arbetet utgår från en systemsyn där produktionsanläggningar, fjärrvärmenätet och byggnadens värmesystem påverkar varandra. Att utgå från ett systemperspektiv är i sig inget nytt, till exempel har Frederiksen och Werner båda presenterat doktorsavhandlingar där fjärrvärmeteknik analyserats på en systemnivå.

Titeln på denna avhandling har valts så att de olika ingående delarbeten kan inrymmas inom titeln. Dock måste det framhållas att författaren har arbetat under premissen, att valen av delarbeten bl.a. bestämts av hur arbetet kunnat finansieras i olika tidsskeden. Ur rent akademisk synpunkt har detta inneburit en svårighet att skapa en konsekvent helhet. Å andra sidan har villkoren inneburit goda möjligheter att genomföra undersökningar som bedömts vara betydelsefulla inom utvecklingen av den praktiska fjärrvärmetekniken. Läsare som tagit del av andra tekniska doktorsavhandlingar som publicerats på senare tid är sannolikt väl förtrogna med denna problematik.

2 GRUNDLÄGGANDE FJÄRRVÄRMETEKNIK

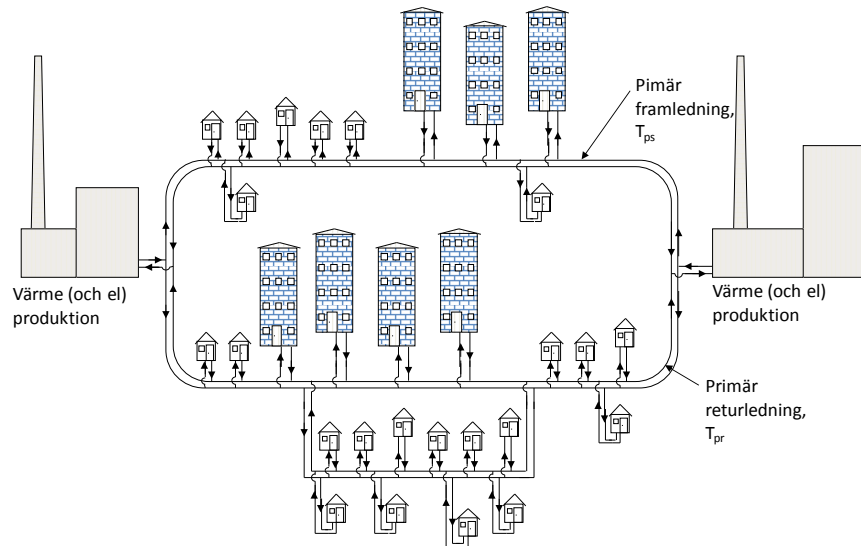
I Sverige står idag fjärrvärme för drygt hälften av den energi som används till uppvärmning. Även inom Sverige skiljer sig fjärrvärmens användning beroende på byggnadstyp. För flerbostadshus och lokaler är fjärrvärme det totalt dominerande uppvärmningssättet med 82 respektive 68%⁴. För småhus är el och biobränsle de dominerande uppvärmningsslagen, och fjärrvärme står endast för 12%⁵. Fjärrvärme utgör således en viktig del av det svenska energisystemet. Även internationellt utgör fjärrvärmerna en viktig del av många länders energisystem.

Ett fjärrvärmesystem består av en eller flera produktionsanläggningar som producerar värme, distributionsledningar där värmen transporteras och kundanläggningar där värmen överförs till användaren i en fjärrvärmecentral. I produktionsanläggningar kan fjärrvärme produceras med exempelvis en panna, värmepump eller spillvärme. Även kombinerad el och värmeproduktion (CHP) är vanligt förekommande. Till fjärrvärmecentralen finns en värmelast (uppvärmning och varmvatten) kopplad. De primära distributionsledningarna består så gott som uteslutande av nedgrävda isolerade rör som binder samman produktionsanläggningarna och fjärrvärmecentralerna. Tillsammans bildar distributionsledningarna ett distributionsnät som utgörs av ett rörnät där hetvatten cirkuleras, se Figur 1.⁶

⁴ Energimyndigheten, Energy in Sweden 2010, 2010

⁵ Energimyndigheten, Energy in Sweden 2010, 2010

⁶ Frederiksen, S., Werner, S, 1993



Figur 1. Illustration av ett förenklat fjärrvärmesystem med två värmeproduktionsanläggningar.

Figure 1. Principle of a simplified district heating network with two heat production units.

Genom att värmen produceras centralt på ett eller flera ställen i fjärrvärmenätet kan miljöfördelar uppnås genom mer kostnadseffektiv rökgasrening, effektivare förbränningsanläggningar samt tillvaratagande av spillvärme från industrier och reningsverk, vilket bidrar till ökad energihushållning. En annan viktig aspekt av nyttan med fjärrvärme är dess stora bränsleflexibilitet. Fjärrvärme bidrar inte enbart till värmeförsörjningen, utan även till ca 10% av Sveriges elproduktion genom användande av effektiv kraftvärmeteknik där el och värme produceras samtidigt.

Vattnet i fjärrvärmenätet, primärvatten, cirkuleras ständigt med pumpkraft. En hög avkylning av primärvattnet i de anslutna byggnaderna är viktigt för effektiviteten i fjärrvärmenätet och påverkar verkningsgraden och/eller värmeutbytet i värmeproduktionsanläggningar. Avkylningen av fjärrvärmevattnet beror på en rad olika faktorer som typ av fjärrvärmecentral samt vilka temperaturnivåer som råder i det sekundära systemet (den anslutna byggnadens interna system). En ökad avkylning av primärvattnet minskar även tryckförlusterna i fjärrvärmenätet då flödet minskar. Detta leder till att mindre pumpenergi behövs för att cirkulera primärvattnet. Ökad avkylning minskar även den totala värmeförlusten i fjärrvärmenätet genom att temperaturnivån i fjärrvärmesystemet sjunker.

Framledningstemperaturen i ett fjärrvärmenät är beroende av värmelasten. Vintertid, då värmelasten är hög är fjärrvärmemetemperaturen hög, ofta kring eller över 100°C. Framledningstemperaturen minskar sedan då värmelasten minskar för att sommartid vara ungefär 70°C. Att framledningstemperaturen är högre vintertid beror främst på två faktorer; 1) att temperaturbehovet i de anslutna byggnaderna är högre vintertid, 2) för att begränsa flödet i fjärrvärmenätet då energibehovet är stort.

Som tidigare nämnts möjliggör fjärrvärmeteknik effektivt utnyttjande av ett flertal bränslen. Utvärdering av fjärrvärmens effektivitet kan utföras på ett antal olika sätt, varav en termodynamisk utvärdering är den mest självklara. Idag när miljöfrågor är

på agendan är livscykelanalys (LCA), primärenergifaktorer (PEF) och CO₂ indikatorer populära utvärderingsmetoder. Användandet av PEF har många likheter med LCA, men med den skillnaden att PEF fokuserar på energiåtgång och mindre på miljöpåverkan. Enligt EU direktivet angående byggnaders energiprestanda skall energianvändningen i en byggnad presenteras i termer av primärenergianvändning. Primärenergibegreppet diskuteras i denna avhandling och används för exemplifiering av nyttan med sänkta primärtemperaturer.

2.1 Fjärrvärmeanslutna byggnader

I fjärrvärmeanslutna byggnader används fjärrvärme för uppvärmning och tappvarmvattenberedning. Värmen från fjärrvärmevattnet överförs till de husinterna värme- och varmvattensystemen i en fjärrvärmecentral, där primärvatten och det husinterna systemet hålls hydrauliskt separerade av värmeväxlare. Värmeväxlarna som används i fjärrvärmecentralen är företrädesvis hellödda plattvärmväxlare. En fjärrvärmecentral kan kopplas enligt flera olika kopplingsprinciper, varav de två vanligast förekommande i Sverige är parallell- och tvåstegskopplingar. Se exempelvis Frederiksen⁷ och Svensk fjärrvärme, Rapport 2009:3⁸. I Artikel V i denna avhandling är primära returtemperaturer beräknade för två alternativa kopplingsprinciper.

Fjärrvärmeanslutna byggnaders värmesystem består vanligtvis av ett radiatorsystem. Värmesystemet är dimensionerat för att ha maximal värmeavgivning vid den dimensionerande utomhustemperaturen (DUT). Byggnadens värmebehov antas därefter sjunka linjärt mot noll som nås vid byggnadens balanstemperatur, vid vilken den interna värmegenereringen täcker resterande uppvärmningsbehov. Radiatorsystemet är oftast dimensionerat för ett konstant radiatorflöde (sekundärflöde) där värmeavgivningen från radiatorerna justeras genom att den sekundära framledningstemperaturen förändras enligt en förprogrammerad radiatorkurva. Radiatorkurvan är en funktion av utomhustemperaturen, tidskonstant för byggnaden samt, i vissa fall, en återkoppling till aktuell inomhustemperatur. För att begränsa uppvärmningen lokalt i byggnaden finns ofta termostatventiler monterade på radiatorerna för att minska radiatorflödet och på så vis begränsa radiatorns värmeavgivning. Radiatorvattnet cirkuleras med elektrisk pumpkraft i byggnaden för att distribuera värme.

Värmeavgivningen från en radiator kommer från konvektion och strålning. Fördelningen mellan avgiven värme från strålning och konvektion beror på radiatorns konstruktion och utseende.

Under uppvärmningssäsongen är fjärrvärmereturtemperatur beroende av radiatorsystemets returtemperatur. Sänkt returtemperatur i radiatorsystemet är därför ett viktigt område för fjärrvärmeforskning och så även i denna avhandling. I Artikel I beskrivs en metod för att ge den lägsta möjliga primärtemperaturen för alla förekommande driftsfall. En metod för att sänka temperaturprogrammet för uppvärmning för befintliga radiatorer beskrivs i Artikel VII och Artikel VIII.

⁷ Frederiksen, S., Werner, S, 1993

⁸ Svensk Fjärrvärme, Rapport 2009:3, 2009

I Sverige finns regler för erforderlig tappvarmvattentemperatur. Boverket ställer krav på en tappvarmvattentemperatur på minst 50°C för att undvika Legionella tillväxt, och högst 60°C för att undvika skällning⁹. För att undvika långa väntetider för tappvarmvatten kan vattnet cirkuleras i byggnaden. Detta är vanligt förekommande i större byggnader såsom flerbostadshus. Då tappvarmvattnet cirkuleras måste temperaturen vara minst 50°C i hela cirkulationssystemet. Detta medför relativt höga primära returtemperaturer under perioder utan varmvattentappningar.

⁹ Boverket, 2008

3 UTVÄRDERING AV ENERGIANVÄNDNING

Det har sedan länge i många industriländer varit ett huvudmål inom energipolitiken att spara energi. Detta har i betydande grad skett med framgång. Normer för energianvändning i nybyggda hus har ständigt stramats åt, och idag finns det hus som benämns ”passivhus” ur energianvändningssynvinkel. Prioritering av energisparande ingår även i denna avhandling som en väsentlig premis.

Vid konkretisering av energisparande i samband med bl.a. fjärrvärmeteknik är det viktigt att ha insikt om hur energisystemet är uppbyggt som helhet för att på ett korrekt sätt kunna prioritera olika typer av energibesparande insatser. Att veta vilka systemgränser som bör ingå i en sådan bedömning är av stor vikt. Exempelvis kan det vara mera effektivt att investera i utnyttjande av kraftvärmeteknik än ökad byggnadsisolering, något som visas av Joelsson¹⁰.

Energianvändningen kan utvärderas enligt en rad olika metoder. Vilken metod som väljs är ofta beroende på vem som utför utvärderingen och vem som är uppdragsgivare. Exempel på sådana metoder för utvärdering av byggnaders energianvändning är:

- Klassisk termodynamisk utvärdering
- Ekonomisk utvärdering
- Miljömässig utvärdering
- Utvärdering enligt primärenergibegreppet

I denna avhandling har energianvändningen utvärderats enligt primärenergibegreppet som enligt EU-direktivet ”Energy Performance of Buildings Directive (2010/31/EU)”¹¹ skall ingå vid energideklarering av byggnader. Primärenergibegreppet uppmuntrar en ökad systemsyn då energianvändningen presenteras. Vad som är särskilt intressant i fjärrvärmesammanhang är den konkurrensfördel som detta begrepp kan innebära.

Genom användande av primär energianvändning eller primärenergifaktorer (PEF) beaktas inte endast den inköpta mängden energi, utan även den energi som används högre upp i förädlingskedjan. Primärenergikonceptet har många likheter med livscykelanalys (LCA), men med den skillnaden att PEF fokuserar på energikedjan medan fokuset för LCA ligger på miljöpåverkan¹². Genom den ökade systemsynen som primärenergibegreppet innebär är detta ett användbart verktyg vid diskussioner om energiförbättrande åtgärder. I en artikel¹³ visar Joelsson och Gustavsson att valet av uppvärmningssystem har en större påverkan på primärenergianvändning än energiförbättrande åtgärder i byggnadens klimatskal.

¹⁰ Joelsson, A., Gustavsson, L., 2009

¹¹ The European parliament and the council of the European union, Directive 2010/31/EU, 2010

¹² Berner, M., Ulseth, R., 2008

¹³ Joelsson, A., Gustavsson, L., 2009

I kommande avsnitt definieras primärenergi, visas hur detta kan implementeras i fjärrvärmesammanhang och hur primärenergibegreppet är implementerat i några EU-länder.

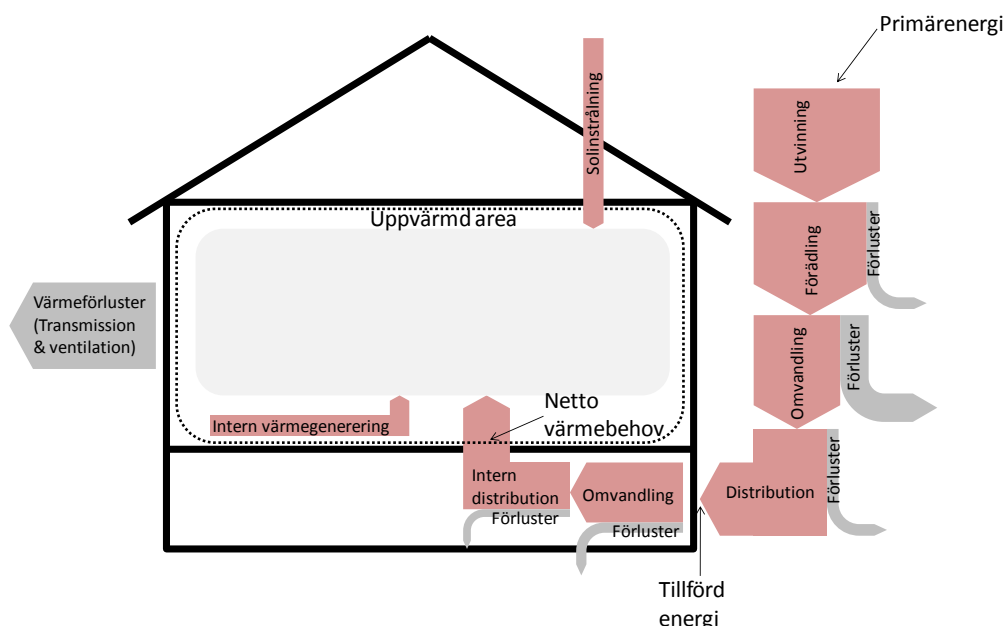
3.1 Primärenergi

EEA (The European Environment Agency)¹⁴ har definierat primärenergi som:

“Energy embodied in natural resources (e.g. coal, crude oil, sunlight, uranium) that has not undergone any anthropogenic conversion or transformation”.

(“Energi som ingår i naturresurser (t.ex. kol, råolja, solljus, uran) som inte har genomgått någon antropogen omvandling”)

Resultatet från utvärdering av en byggnads energianvändning är beroende på hur systemgränserna är definierade. En vanlig energifaktura säger inget om den energi som åtgått högre upp i energikedjan vid t.ex. utvinning, förädling och distribution. Med ett primärenergibegrepp omfattas däremot energianvändningen i hela energikedjan. Den primära energianvändningen fås genom att den köpta energin multipliceras med en primärenergifaktor (PEF) för den aktuella energibäraren. Se Figur 2 för en översikt av olika systemgränser för energianvändningen i en byggnad.



Figur 2. Illustration av systemgränser för primärenergi.

Figure 2. Illustration of primary energy system boundaries.

I EN 15603:2008¹⁵ standarden är primärenergibegreppet definierat och primärenergifaktorer är bestämda för fjorton olika energibärare baserat på europeiska

¹⁴ The European Environment Agency, hemsida, besökt 2010-11-11

¹⁵ European Committee for standardization, 2008

förhållanden. I standarden definieras två typer av primärenergifaktorer, en total primärenergifaktor (PEF_T) och en icke förnybar primärenergifaktor (PEF_{N-R})¹⁶.

I dagsläget saknas standardiserade PEF för ett antal energibärare. Detta kan orsaka felaktiga beslut då primärenergieffektivisering skall utföras, och resultera i onödiga CO₂ utsläpp.¹⁷

3.2 Fjärrvärme och primärenergibegreppet

I ett fjärrvärmesystem kan värmen produceras med ett stort uppslag av metoder och med många olika energibärare som bränsle. När PEF beräknas för ett fjärrvärmesystem måste man ta hänsyn till detta. I den europeiska standarden, EN15316-4-5¹⁶, är systemgränserna för beräkning av PEF för fjärrvärme bestämda. Principiellt beräknas PEF för fjärrvärme som kvoten mellan insatt primärenergi och levererad energi (värme)¹⁶, se ekvation (1).

$$f_{P,DH} = \frac{E_P}{Q_{del}} = \frac{\sum_i E_{F,i} \cdot f_{P,F,i}}{\sum_j Q_{del,j}} \quad (1)$$

Insatt primärenergi i ekvation (1) är summan av använd energi för värmeproduktion, E_F , multiplicerad med PEF för respektive energislag ($f_{P,F}$). Den levererade värmen är angiven som Q_{del} i ekvation (1). För fjärrvärmesystem med kraftvärmeproduktion, där både elektricitet och värme produceras samtidigt, är ekvation (1) inte tillämplig, utan en metod för beräkning av PEF för fjärrvärme med kraftvärmeproduktion skall användas. Metoden baseras på en energibalans över värme och elproduktionen, se ekvation (2)¹⁶.

$$f_{P,DH} \cdot \sum_j Q_{del,j} + f_{P,el} \cdot E_{el,CHP} = \sum_i E_{F,i} \cdot f_{P,F,i} \quad (2)$$

där:

$E_{el,CHP}$ är den elektricitet som produceras i kraftvärmeverket och exporteras utanför systemgränsen

$f_{P,el}$ är PEF för den elektricitet som den producerade elen ersätter

Ur ekvation (2) kan PEF för fjärrvärme lösas ut och beräknas enligt ekvation (3). Denna metod kallas ofta för "the Power Bonus Method".

$$f_{P,DH} = \frac{\sum_i E_{F,i} \cdot f_{P,F,i} - f_{P,el} \cdot E_{el,CHP}}{\sum_j Q_{del,j}} \quad (3)$$

Genom att studera ekvation (3) ser man att PEF för fjärrvärme är beroende på hur PEF för den substituerade elektriciteten är definierad. Detta medför att en diskussion kring vilken PEF som skall väljas för den substituerade elektriciteten kan uppstå. Till exempel skiljer sig PEF för elektricitet producerad i kolkondenskraftverk och vattenkraftverk kraftigt från varandra.

¹⁶ European Committee for standardization, 2008

¹⁷ Berner, M. et al., 2010

Således är typ av elproduktion eller elproduktionsmix som skall ansättas som substituerad elektricitet avgörande för fjärrvärmens PEF då CHP-teknik används. En möjlighet är att utnyttja ett marginalelsperspektiv, det vill säga att den producerade elektriciteten antas ersätta elektricitet producerad i kolkondenskraftverk.

I Artikel IX exemplifieras inverkan av valet av PEF för den substituerade elektriciteten för ett fjärrvärmesystem vars värmeproduktion huvudsakligen är baserad på kraftvärme. Tre olika PEF för elektricitet är undersökta: 1) Kolkondensel, 2) Europeisk elmix och 3) Nordisk elmix. Resultatet från studien visar att PEF för fjärrvärme varierar kraftigt beroende på vilken av dessa tre substitutionsmetoder som används.

I en svensk rapport¹⁸ från 2009 anges att valet av hur den substituerade elektriciteten var producerad hade en mindre påverkan på PEF för fjärrvärme, däremot ett större inflytande på CO₂ utsläppen. Detta berodde på att PEF för elektricitet producerad i kolkondenskraftverk och för nordisk elmix, som användes i rapporten inte skilde sig åt i samma utsträckning som de faktorer som använts i detta arbete (Artikel IX). Gode¹⁸ använde $PEF_{el}=2,5$ för kolkondens och $PEF_{el}=1,8$ för nordisk elmix medan EN-standarden¹⁹ anger $PEF_{el}=4,05$ för kolkondens och PEF_{el} för nordisk elmix beräknades till 2,15 i Artikel IX. Med dessa värden påverkas PEF för fjärrvärme kraftigt beroende på vilken typ av el/elmix som väljs.

Även hur själva värmen produceras i ett fjärrvärmesystem påverkar PEF för fjärrvärme kraftigt. En stor andel av spillvärme minskar PEF för fjärrvärme. Även ett biobränsleeldat kraftvärmeverk minskar fjärrvärmens PEF om den substituerade elektriciteten antas vara producerad i kolkondenskraftverk. För att öka incitamenten för ökad kraftvärmeutbyggnad i Sverige poängterar Carlson²⁰ att:

"För att fjärrvärmeunderlagen i närtid ska fortsätta vara en bra grund för kraftvärme behövs att primärenergisynsättet används vid diskussionerna vid energieffektivisering."

I en bilaga²¹ till en SABO rapport finns PEF för fjärrvärme i 372 svenska fjärrvärmesystem angivna. Medelvärde för PEF för svensk fjärrvärme angavs till 0,98, men spridningen är stor mellan de olika fjärrvärmesystemen, se Figur 3. Liknande resultat är även publicerade av Gode²².

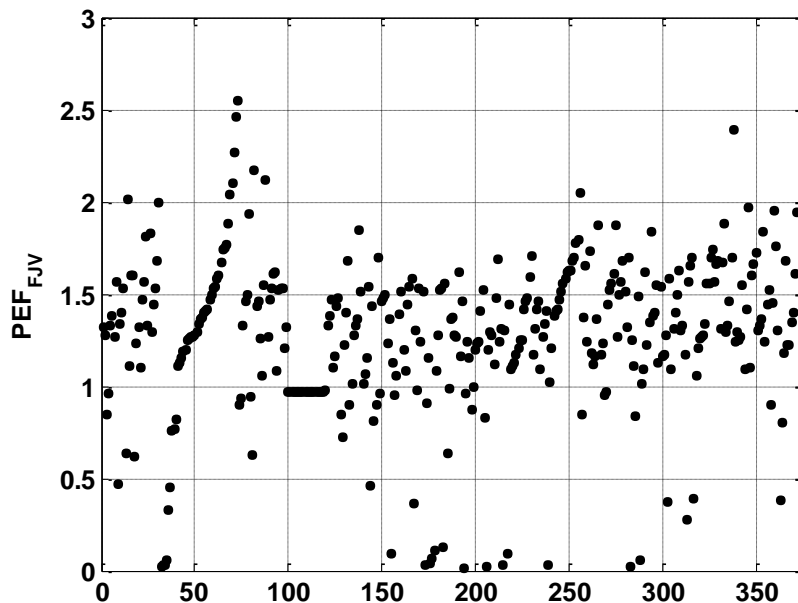
¹⁸ Gode, J. et al., 2009

¹⁹ European Committee for Standardization, 2008

²⁰ Carlson, A., 2009

²¹ SABO, 2010

²² Gode, J. et al., 2009



Figur 3. PEF för 372 svenska fjärrvärmesystem (baserad på data från SABO²³)
 Figure 3. PEFs for 372 DH networks in Sweden (based on data from SABO²³)

Som synes är variationen av PEF för olika fjärrvärmesystem stor. Därför är det viktigt att använda lokala PEF för fjärrvärme när en byggnads primärenergianvändning beräknas. Användandet av lokala PEF för fjärrvärme möjliggör en visualisering av nyttan med kraftvärmeproduktion och utnyttjande av spillvärme. I EU direktivet 2010/31/EU²⁴ står det att:

“The energy performance of a building shall be expressed in a transparent manner and shall include an energy performance indicator and a numeric indicator of primary energy use, based on primary energy factors per energy carrier, which may be based on national or regional annual weighted averages or a specific value for on-site production”.

(“Energiprestanda i en byggnad skall uttryckas på ett tydligt sätt och innehålla en indikator energiprestanda och en numerisk indikator för primärenergianvändningen baserat på primärenergi faktorer per energibärare, vilka kan baseras på nationella eller regionala årliga vägda medelvärden eller ett specifikt värde för en anläggning”)

I en studie av Joelsson och Gustavsson har primärenergianvändningen för villor undersökts för olika uppvärmningsalternativ. Villor försedda med fjärrvärme var tillsammans med villor med värmepumpar de uppvärmningssystem som hade lägst

²³ SABO, Bilaga, 2010

²⁴ The European parliament and the council of the European union, Directive 2010/31/EU, 2010

primärenergianvändning^{25,26}. Uppvärmningssystemet med högst primärenergianvändning var elvärme. Liknande resultat redovisas även av Karlsson²⁷.

3.3 Implementering av primärenergibegreppet

I dagsläget är det oklart i vilken utsträckning som primärenergibegreppet kommer att implementeras vid energideklaration av byggnader. En implementering av primärenergibegreppet medför både principiella och praktiska svårigheter. Trots detta har jag valt exemplifiera förändrade temperaturnivåer i ett fjärrvärme system genom beräknade PEF.

Den 1:a oktober 2006 inträdde lagen om energideklarationer av byggnader i Sverige²⁸. Syftet med denna lag är att minska energianvändningen i det svenska byggnadsbeståndet. Efter en energideklaration utfärdas ett energicertifikat som skall innehålla uppgifter om byggnadens energianvändning, referensvärden för likande byggnader och förslag på kostnadseffektiva energiförbättrande åtgärder. Energicertifikatet skall vara offentligt tillgängligt. I en handbok för energibesiktning av byggnader skriver Adelberth och Wahlström²⁹ att energianvändningen är definierad som levererad energi (köpt energi). I det nyligen tillkomna EU-direktivet (2010/31/EU) är dock kravet på energideklarering av byggnader skärpta.

I Sverige är Boverket den myndighet som sätter riktlinjerna för hur en energideklaration skall utföras och vad den skall innehålla. Boverket är även den myndighet som sätter kraven för byggregler och energiprestanda för nybyggnation i de nationella byggreglerna (BBR)³⁰. Boverket har yttrat sig angående de nya striktare EU-kraven på införande av primärenergianvändning i energideklarationer. Boverket³¹ skriver att:

“I Sverige har vi inget uttryckligt krav på numerisk indikator för primärenergi men SIS skulle kunna ta fram ett klassningssystem med indikatorer även för primärenergi. I dagsläget skiljer vi bara mellan användning av el och användning av annan energi. Svenska byggregler har strängare krav för eluppvärmda byggnader”

(SIS är centret för standardisering i Sverige. SIS är samarbetspartner i internationella standardiseringsnätverk, som t.ex. CEN och ISO i vilka Sverige även är medlem)³²

I ett förslag på revidering av avsnitt 9 (Energihushållning) i de svenska byggreglerna, diskuteras även införande av primärenergibegreppet för

²⁵ Joelsson, A., Gustavsson, L., 2008

²⁶ Joelsson, A., Gustavsson, L., 2009

²⁷ Karlsson, Å., 2003

²⁸ Svensk författningssamling, 2006

²⁹ Adalberth, K., Wahlström. Å. , 2009

³⁰ Boverket, 2008

³¹ Boverket, 2010

³² SIS: "What is SIS?", internetsida

nybyggnation³³. Det anges att det inte finns några bindande krav på att införa ett primärenergibegrepp i byggreglerna för nybyggnation, och därför skall inte ett sådant begrepp införas³³. Argumentet för detta är att energitillförseln i en byggnad kan komma att förändras under byggnadens livslängd.

Dock finns det flera europeiska länder som redan har inkluderat primärenergi-användning i kraven på nybyggnation och energideklarering. Tyskland, Frankrike och Polen är exempel på sådana länder³⁴. I en sammanställning av kraven och beräkningsmetoder för energianvändning för nybyggnation för EU-länderna av Kurnitski³⁵ delas kraven upp i tre grupper:

- Krav på energianvändning på komponentnivå (ex. Finland)
- Krav på total energianvändning (ex. Sverige, Norge)
- Krav på primärenergianvändning (ex. Tyskland, Frankrike, Storbritannien)

Enligt Kurnitski³⁵ är trenden att fler länder kommer att införa krav på primärenergianvändningen i byggreglerna.

³³ Boverket, Remiss, 2010

³⁴ EPD Building platform, 2008

³⁵ Kurnitski, J., 2008

4 METODER FÖR SÄNKTA FJÄRRVÄRMETEMPERATURER

Att sänka fjärrvärmesystemtemperaturer är fördelaktigt för fjärrvärmesystemet är ett redan välkänt faktum. Värmeförluster i fjärrvärmenätet minskar samtidigt som många värmeproduktionsanläggningar ökar sin verkningsgrad. Sänkta fjärrvärmesystemtemperaturer medför även en ökad möjlighet för användning av fjärrvärmeledningar i plastmaterial, vilka ofta är känsliga för höga temperaturer. Allt detta har lett till en fokusering på sänkning av fjärrvärmesystemtemperaturer både inom fjärrvärmeforskningen och i det praktiska fjärrvärmearbetet.

För att ett fjärrvärmenät skall utnyttjas så effektivt som möjligt är det viktigt att maximera avkylningen av primärvatten i fjärrvärmecentralerna. En ökad primäravkylning innebär att samma mängd värme kan distribueras med ett minskat massflöde. I Sverige är det vanligt att priset för fjärrvärme inte enbart baseras på använd energi, utan även på den primära avkylningen eller primärflödet. Med denna typ av prissättning är det alltså inte enbart fjärrvärmebolagen som gynnas av en ökad avkylning utan även de anslutna kunderna.

Det finns många tillvägagångssätt för att sänka fjärrvärmesystemtemperaturer, av vilka flera går ut på att öka befintliga dimensioner såsom värmeväxlarytor och radiatorer eller antalet radiatorer i sekundära system vid nybyggnation. Till viss mån bidrar även en ökad byggnadsisolering till primärtemperatursänkningar genom minskat värmebehov och därmed lägre radiatortemperaturer.

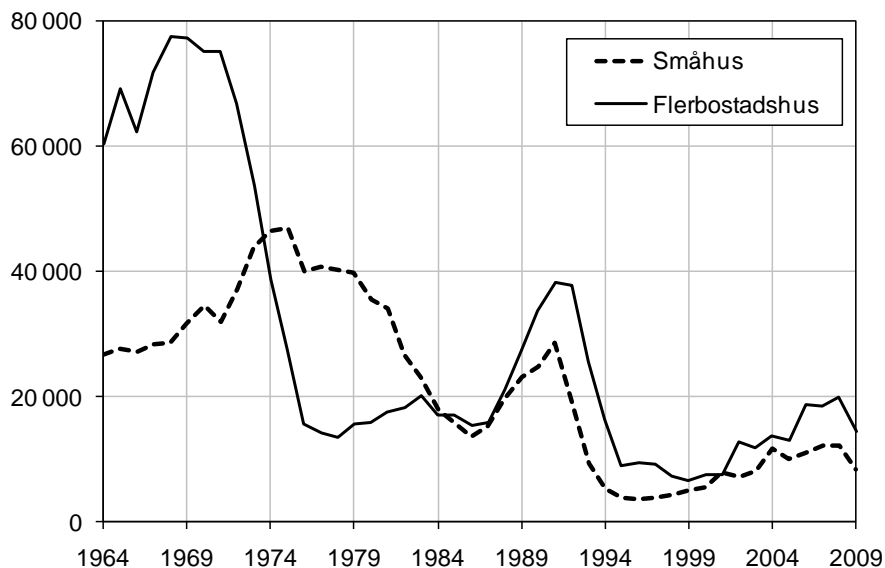
För ett befintligt fjärrvärmesystem med redan anslutna fjärrvärmekunder minskar möjligheten till förbättringar då valmöjligheterna begränsas av de redan gjorda investeringarna. Om exempelvis den primära framledningstemperaturen sänks i ett befintligt fjärrvärme system utan att andra åtgärder görs kommer primärflödet i fjärrvärmenätet att öka. För detta krävs att det i fjärrvärmenätet finns en tillgänglig flödeskapacitet och att de maximalt tillåtna trycknivåerna ej överstigs, vilket är naturligtvis inte alltid fallet.

I denna avhandling undersöks tre metoder för att sänka eller möjliggöra sänkning av fjärrvärmesystemtemperaturer för befintliga fjärrvärmesystem. De tre metoderna är:

1. Ökad värmeavgivning från radiatorer kompletterade med fläkt
2. Fjärrvärmecentraler med alternativa kopplingsprinciper
3. Optimerad radiatorstyrning

Samtliga av dessa tre metoder är särskilt lämpliga för att implementeras i redan befintliga fjärrvärmeanslutna byggnader. Detta eftersom ingen av de tre metoderna kräver omfattande ingrepp i byggnadens vattenburna värmesystem, något som ofta kan betraktas som kostsamt. Då värmeavgivningen från en radiator ökas enligt metod nummer 1 minskar temperaturbehovet för uppvärmning i byggnaden. Detta innebär att inte endast den primära returtemperaturen sänks, utan även att framledningstemperaturen kan sänkas utan att primärflödet i fjärrvärmenätet påverkas.

Då man tittar på byggnadsår för bostäder i det svenska fastighetsbeståndet syns det tydligt att en stor andel av flerbostadshusen är byggda före 1970, se Figur 4. Isoleringsstandarden i dessa byggnader är betydligt lägre än dagens standard. Vidare är värmesystemen ofta överdimensionerade. Detta beror främst på två saker: ursprunglig överdimensionering och att överdimensionering uppstår till följd av energibesparande åtgärder. Då värmesystemen är överdimensionerade är en optimerad radiatorstyrning en särskilt lämplig metod för att sänka den primära returtemperaturen. Detta kan åstadkommas utan att några förändringar behöver utföras i värmesystemet förutom att introducera styrning av radiatorsystemet och en cirkulationspump med varvtalsreglering.



Figur 4. Byggnadsår för den svenska bostadsbebyggelsen³⁶.
Figure 4. Construction date for Swedish building stock³⁶.

Med radiatorfläktar är det möjligt att radikalt sänka temperaturprogrammet i ett befintligt värmesystem utan att radiatorerna behöver bytas ut. Då även framledningstemperatur till radiatorerna sänks, kan även den primära framledningstemperaturen sänkas utan att flödet i fjärrvärmenätet förändras. Brumm³⁷ föreslog i en artikel från 1977 fläktar monterade på radiatorer för att sänka radiatortemperaturer i befintliga värmesystem. Radiatorfläktar kan installeras på radiatorer i hela byggnaden för att sänka temperaturprogrammet, eller endast i delar av byggnaden där värmeavgivningen från befintligt system är otillräckligt.

Trots att tidigare studier visat att kopplingsprincipen för fjärrvärmecentralen inte är den viktigaste faktorn för god primär avkylning (se ex. Zinko³⁸) har kopplingsprincipen en betydelse, särskilt för värmesystem av lågtemperaturtyp. Den primära

³⁶ Statistiska centralbyrån, hemsida, besökt 2011-01-21

³⁷ Brumm, W., 1977

³⁸ Zinko, H., 2005

returtemperaturen är beräknad för fjärrvärmeanslutna byggnader med alternativa kopplingsprinciper i Artikel V.

Utnyttjande av alternativa kopplingsprinciper och optimerad radiatorstyrning har en gemensam fördel; de kan implementeras utan tillgång till samtliga utrymmen där det finns radiatorer.

Lindkvist och Walletun³⁹ har visat på att ett välfungerande och korrekt injusterat uppvärmningssystem är mycket viktiga faktorer för att erhålla god primär avkylning. Dock förekommer det i de fjärrvärmeanslutna byggnaderna fel och brister i de tekniska systemen som kan påverka avkylningen negativt. Fel i fjärrvärmecentralen såsom försmutsning av värmeväxlarytor, läckande styrventiler och felaktig temperaturreglering kan orsaka onödigt höga primära returtemperaturer. En möjlig orsak till läckande styrventiler är kavitation. I en studie av författaren till denna avhandling⁴⁰ har kavitationsbenägenheten för sex i fjärrvärmesammanhang vanligt använda styrventiler undersökts experimentellt. Resultaten från studien visar att vid normal dimensionering, vilket oftast innebär att överdimensionerade ventiler används, undviks eller minskar risken för att kavitation i styrventiler uppstår under normala driftförhållande. Under experimenten kaviterade ventilerna främst vid höga differenstryck och stora öppningsgrader⁴⁰. Detta är viktigt att beakta särskilt för stora fjärrvärmenät och för system där den primära framledningstemperaturen sänkts på bekostnad av ett ökat primärflöde.

De fel som uppstår till följd av kavitation är främst oljud, men kraftig och långvarig kavitation kan även leda till skador på ventilkägla och ventsätet. Detta kan i sin tur leda till att styrventilen inte längre håller tätt i stängt läge, vilket kan orsaka onödigt höga primära returtemperaturer sommartid då ingen värmelast finns. Se Sammanfattning av rapport A eller den fullständiga rapporten *”Kavitation i styrventiler – laboratorieundersökning”*⁴⁰ för en utförligare beskrivning av den experimentella kavitationsundersökningen.

Många forskningsstudier har undersökt inverkan av förändrade fjärrvärmesystemtemperaturer på ett helt fjärrvärmesystem. Ett exempel på detta är det svenska beräkningsprogrammet ”LAVA-kalkyl”⁴¹. Resultatet av förändrade fjärrvärmesystemtemperaturerna presenteras som ekonomiskt resultat och i förändrade emissioner. I andra studier presenteras resultatet av sänkta fjärrvärmesystemtemperaturer i mera allmänna ordalag. Werner⁴² uppskattar nyttan av sänkt primär returtemperatur till 1 kr/MWh°C. I Artikel IX analyseras en implementering av optimerad styrning av temperaturprogram för radiatorer samt installation av radiatorfläktar med ett primärenergibegrepp.

I nästkommande kapitel beskrivs de tre metoderna för sänkta fjärrvärmesystemtemperaturer mera ingående. Sedan följer ett avsnitt där en kraftvärmeanläggnings primärtemperaturberoende studeras. I det sista avsnittet exemplifieras nyttan med

³⁹ Lindkvist, H., Walletun, H., 2005

⁴⁰ Johansson, P.-O., Wollerstrand, J., 2009

⁴¹ Svensk Fjärrvärme, Rapport 2009:50, 2009

⁴² Werner, S., 2004

radiatorfläktar och optimerad radiatorstyrning för ett fjärrvärmesystem med kraftvärmeproduktion genom beräkning av förändrade primärenergifaktorer för fjärrvärme.

Beräkningarna och modelleringar av fjärrvärmecentraler, värmeväxlare och radiatorer är baserade på tidigare arbete av Gumméus⁴³. Dessa modeller har genom åren använts vid vår institution och har vidareutvecklats av bland andra Wollerstrand⁴⁴ och Persson⁴⁵. Teoretiska beräkningar är utförda med programvaran Matlab[®] och realtidssimuleringar är utförda i Simulink[®].

4.1 Radiatorfläktar

Värmeavgivningen från en radiator kommer från strålning och från naturlig konvektion. Båda dessa delar är beroende av temperaturdifferensen mellan radiatorns yta och omgivningen. För en enkel panelradiator utan konvektionsplåt uppgår andelen värmeavgivning från strålning till ca 50%⁴⁶. Genom att utrusta befintliga radiatorer med fläktar för att åstadkomma påtvingad konvektion ökar den sammanlagda värmeövergångskoefficienten. På marknaden finns det idag ett antal enkla system som bygger på denna princip^{47, 48, 49}. Dessa produkter marknadsförs dock endast i mindre omfattning. I denna avhandling undersöks effekten på värmeavgivningen för en radiator med påbyggda fläktar. Se Figur 5 för en principiell illustration av radiatorfläkt monterad på en panelradiator.

⁴³ Gumméus, P., 1989

⁴⁴ Wollerstrand, J., 1993

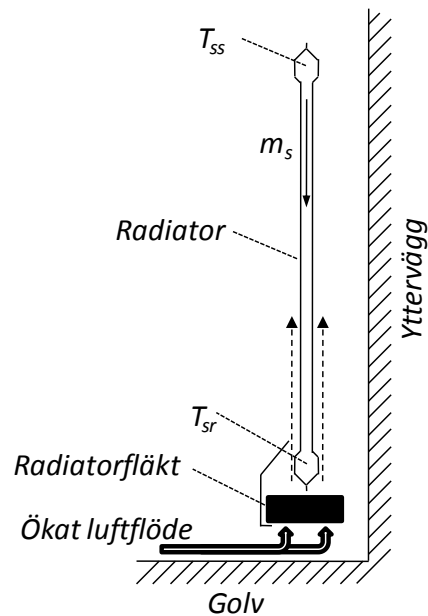
⁴⁵ Persson, T., 2005

⁴⁶ Trüschel, A., 1999

⁴⁷ A-Energi AB, hemsida, besökt 2010-12-16

⁴⁸ Pyrox, Produktkatalog, 2010

⁴⁹ Radiator Booster, hemsida, besökt 2011-04-05



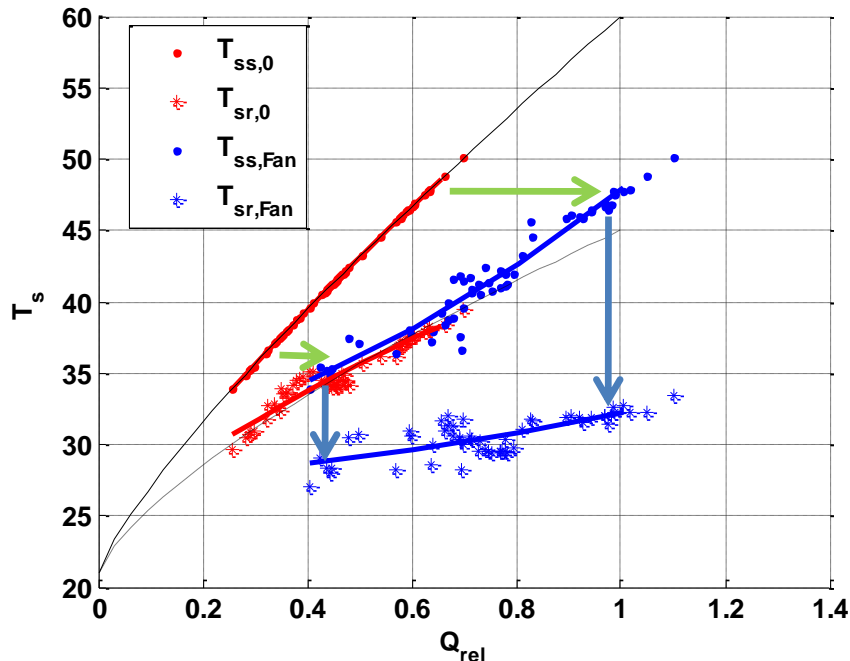
Figur 5. Illustration av radiatorfläkten. [Artikel VII]

Figure 5. Principle of add-on-fan blower. [Paper VII]

Artikel VII beskriver ett fältförsök med radiatorfläktarna. Resultaten visar att värmeavgivningen från radiatorerna ökade som mest med över 60%. Den ökade värmeavgivningen är naturligtvis beroende på fläktens hastighet vilket undersöks mera ingående i Artikel VIII genom CFD-simuleringar.

Genom att öka värmeavgivningen från befintliga radiatorer kan radiatortemperaturen sänkas utan att mängden leverad värme minskar, se Figur 6. Principen är densamma som att ha ett radiatorsystem med överdimensionerade radiatorer där antingen radiatorflödet eller framledningstemperaturen måste justeras ner för att inte övervärmning skall ske. En enkel illustration av detta problem återfinns i Ljunggrens⁵⁰ licentiatavhandling.

⁵⁰ Ljunggren, P., 2006



Figur 6. Temperaturprogram med och utan radiatorfläktar. (Röda markeringar - utan fläktdrift. Blå markeringar - med fläktdrift) [Artikel VII]

Figure 6. Space heating temperatures with and without add-on-fan blowers in operation. (Red markers - without fan operation. Blue markers - with fan in operation.) [Paper VII]

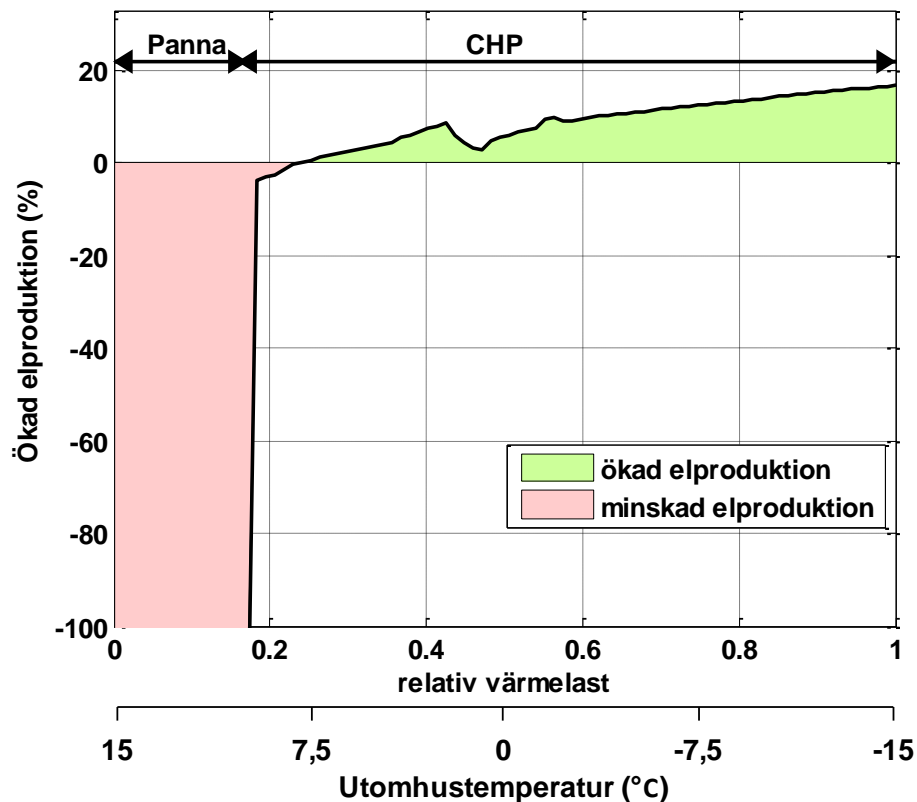
Liknande resultat skulle givetvis kunna uppnås om de befintliga radiatorerna hade ersatts med vattenburna fläktkonvektorer (fan-coils). Detta skulle dock innebära en högre kostnad och ingrepp i det vattenburna värmesystemet.

Fläktarnas elbehov är i undersökningen av storleksordningen 1% av den dimensionerande värmeavgivningen vid 60/45°C temperaturprogram. Det verkliga arbetet som fläkten utför motsvarar dock mindre än 0.1%, vilket innebär att borde finnas utrymme för effektivisering av fläktarna. De sänkta systemtemperaturer som nu kan användas i radiatorsystemet ger direkt en sänkning av den primära returtemperaturen. De sänkta radiatortemperaturerna kan även utnyttjas för att sänka primär framledningstemperatur utan att primärflödet i fjärrvärmecentralen förändras. Resultat från sådan beräkning finns redovisad i Artikel VII och IX. I Artikel IX har även påverkan av de förändrade primära temperaturerna beräknas med ett primärenergiperspektiv.

De nya temperaturprogrammen för radiatorer med fläktdrift som presenteras i Artikel VII baseras på resultat från en fältundersökning där två olika radiator typer utrustats med fläktar. För att fritt kunna variera fläkthastigheten har fältförsöken kompletterats med CFD-simuleringar i Artikel VIII. Simuleringarna av en radiator utrustad med fläkt är utförd med programvaran COMSOL.

En uppenbar nackdel med radiatorfläktar är den ökande elanvändningen. I fallet där fläktdrift utnyttjas för att både sänka den primära fram- och returtemperaturen ökar elproduktionen i ett kraftvärmeverk eftersom α -värdet (elutbytet) ökar. Figur 7

visar hur den ökade elproduktionen kan se ut för ett kraftvärmeverk då fläktar används i radiatorsystemen för att sänka fjärrvärmesystemtemperaturerna. För exemplet i Figur 7 är fläktarnas elanvändning konstant 1% av värmeavgivningen vid DUT. Fläktarnas elanvändning är subtraherad från den producerade elektriciteten.



Figur 7. Möjlig ökning av elproduktionen för ett fjärrvärmesystem genom utnyttjande av radiatorfläktar

Figure 7. Possible increased electricity production in a DH network with utilization of add-on-fan blowers.

Ur Figur 7 framgår det att radiatorfläktarna är till gagn för elproduktionen för större delen av uppvärmningssäsongen om det bidrar till sänkt framledningstemperatur i nätet. Endast då kraftvärmeverket har låg värmelast använder fläktarna mera el än den ökade elproduktionen. Vid låga värmelaster då värmen produceras i en värmepanna är driften av radiatorfläktarna naturligtvis inte nyttig. I Artikel IX har även en driftstrategi implementerats då nyttan av radiatorfläktar beräknas. Driftstrategin går ut på att fläktarna endast är i drift då elproduktionsökningen överstiger elanvändningen för fläktarna.

4.2 Kopplingsprinciper i fjärrvärmecentraler

I dagsläget är två typer av fjärrvärmecentraler dominerande på marknaden, den enklare parallellkopplade och den något mer avancerade 2-stegskopplade. Den parallellkopplade centralen är enkel och robust i sin konstruktion, men ger inte lika

god avkylning som den 2-stegskopplade centralen. Idag har användningen av parallellkopplade fjärrvärmecentraler generellt ökat. Det finns även andra kopplingsprinciper, där den i Sverige vanligast förekommande kallas 3-stegs koppling och ger lägre returtemperatur än de tidigare nämnda kopplingsprinciperna⁵¹.

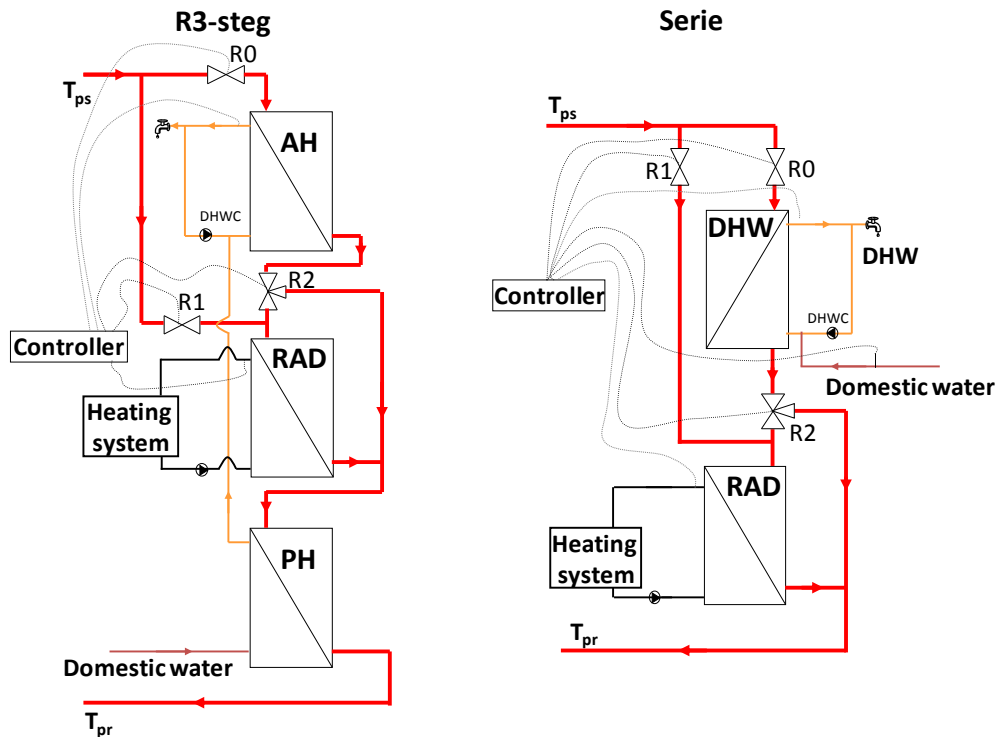
4.2.1 Alternativa kopplingsprinciper

I Artikel V beräknas den primära returtemperaturen för fjärrvärmecentraler med fyra olika kopplingsprinciper för byggnader av olika storlek, olika temperaturprogram för uppvärmning och med lägre tappvarmvattenbehov. Kopplingsprinciperna som undersöks är: parallell-, 2-stegs, rysk 3-stegs (R3-stegs) och en seriekopplad fjärrvärmecentral. Idén med R3-stegskopplade fjärrvärmecentraler är att utnyttja den relativt höga primärtemperaturen efter varmvattenvärmeväxlarens andra steg (AH), något som speciellt är fallet då ingen tappvarmvattenanvändning sker. Principen är samma för den seriekopplade centralen bortsett från att varmvattenberedningen där endast sker i ett steg. Båda dessa kopplingsprinciper förutsätter något mer sofistikerad reglerutrustning än i de konventionella centralerna. Se Figur 8 för kopplingschema för R3-stegs och seriekopplade fjärrvärmecentraler. Fjärrvärmecentraler av R3 typ har tidigare studerats och resultat har presenterats av exempelvis Ljunggren⁵² och Volla m.fl.⁵³.

⁵¹ Frederiksen, S., Werner, S, 1993

⁵² Ljunggren, P. et al., 2004

⁵³ Volla, R. et al., 1996



Figur 8. De två alternativa kopplingsprinciperna som är utvärderade i Artikel V.
 Figure 8. The two alternative connections evaluated in Paper V.

I den R3-kopplade fjärrvärmecentralen reglerar ventil R0 primärflödet genom eftervärmaren (AH) för att säkerställa korrekt tappvarmvattentemperatur. Då primärvattnet lämnar AH leds det, under uppvärmningssäsongen, vidare genom radiatorväxlaren (RAD). Om radiatortemperaturen överstiger börvärdet öppnas ventil R2 för att tillåta ett bypass-flöde direkt från AH till förvärmaren (PH) förutsatt att ventil R1 är stängd. Om erforderlig radiatortemperatur ej uppnås öppnas ventil R1 för att öka primärtemperaturen och flödet till radiatorväxlaren. Notera att allt primärflöde passerar genom PH i en R3-kopplad fjärrvärmecentral.

Vid en första anblick påminner den seriekopplade fjärrvärmecentralen mycket om R3-centralen förutom avsaknaden av AH. Men till skillnad från R3-centralen har den seriekopplade centralen två olika driftslägen som den kan skifta mellan. Vilket driftsläge som väljs är beroende på förekomst av tappvarmvattenanvändning. Då tappvarmvatten används i byggnaden öppnas bypass-porten R2 helt, vilket innebär att centralen fungerar som en traditionell parallellkopplad fjärrvärmecentral. I detta fall förses radiatorväxlaren med primärvatten genom ventil R1. Annars, då ingen tappvarmvattenanvändning sker, regleras den seriekopplade fjärrvärmecentralen enligt samma principer som R3-centralen.

I Artikel V redovisas beräkningsresultat för den primära avkylningen med de olika kopplingsprinciperna. Resultaten visar att den R3-kopplade centralen alltid ger den lägsta primära returtemperaturen. Den seriekopplade centralen ger dock nästan likvärdig avkylning för byggnader med låg tappvarmvattenanvändning.

Primärtemperaturberäkningarna i Artikel V är utförda med realtidssimulering av värme- och tappvarmvattenlast. Simuleringarna är utförda i Simulink®.

Tappningsmönster och tappvarmvattenlasten i beräkningarna är baserade på en statistisk modell som är beskriven av Arvastson och Wollerstrand⁵⁴.

Tappningsmönstren är återgivna i Bilaga 1.

4.3 Alternativ radiatorstyrning

För att uppnå god avkylning av det primära fjärrvärmevattnet är det viktigt att radiatorsystemet är väl injusterat. Värmeavgivningen från ett radiatorsystem kan förenklat sägas bero på två faktorer, flödet genom radiatorerna samt framledningstemperaturen till radiatorerna.

Under uppvärmningssäsongen är fjärrvärmens returtemperatur starkt beroende på temperaturnivåerna i uppvärmningssystemet⁵⁵. De dimensionerande temperaturer som används i radiatorsystemet vid dimensionerande utomhustemperatur är vanligtvis 60/40°C, 60/45°C, 80/60°C, även om andra systemtemperaturer förekommer. En annan injusteringstyp som har blivit vanligt förekommande i Sverige är lågflödesinjustering. Den bygger på ett betydligt lägre flöde genom radiatorerna, en högre framledningstemperatur och därmed en lägre returtemperatur från radiatorerna, typiskt injusterat till ca 80/30°C. Denna typ av injustering har i flera studier visat sig ge en låg primär returtemperatur, se exempelvis⁵⁶.

Vanligen regleras värmeavgivningen genom att framledningstemperaturen till radiatorerna (T_{ss}) regleras samtidigt som flödet genom radiatorerna antas vara oförändrat. De två grundläggande sambanden som styr värmeavgivningen från en radiator är beskrivna i ekvation (4):

$$Q = m_s \cdot C_p \cdot T_{ss} - T_{sr} = U \cdot A \cdot \Delta\theta^n \quad (4)$$

där θT är den logaritmiska medeltemperaturdifferensen mellan radiatorm och omgivande rumstemperatur. n är radiatorexponenten (typiskt $n \approx 1,3$), A (m^2) är den värmeöverförande arean och U ($W/(m^2 \cdot K^n)$) är den förenklade värmeövergångskoefficienten beskriven av Trüschel⁵⁷.

Genom ekvation (4) kan systemkurvor för en radiator beräknas för varje värmelast med ett godtyckligt flöde för en viss radiator med kända värden på U , A och n . Då värmeavgivningen varieras genom att framledningstemperaturen justeras och flödet genom radiatorm bibehålls kommer framledningsskurvan ej att vara linjär mot utomhustemperaturen trots att värmelasten antas minska linjärt med ökad utomhustemperatur.

Genom att studera sambanden mellan radiatorsystemets värmeavgivning och värmeöverföringssambandet i en värmeväxlare kan den primära returtemperaturen beräknas för en godtycklig värmelast vid en godtycklig primär

⁵⁴ Arvastson, L., Wollerstrand, J., 1997

⁵⁵ Råberger, L., 1995

⁵⁶ Andersson, T. et al., 1988

⁵⁷ Trüschel, A., 1999

framledningstemperatur. Ekvation (5) beskriver ett förenklat samband för värmeöverföringen i en plattvärmeväxlare. Ekvationen är beskriven av Wollerstrand⁵⁸.

$$Q = m \cdot c_p \cdot T_{ps} - T_{pr} = \frac{c_0}{\frac{1}{m_p^n} + \frac{1}{m_s^n}} \cdot A \cdot \theta T \quad (5)$$

Där c_0 , n och A är konstanter för värmeväxlaren. θT är den logaritmiska medeltemperaturdifferensen mellan vattnet på primär- och sekundärsidan av värmeväxlaren.

Temperaturverkningsgraden för en värmeväxlare sjunker då värmelasten minskar, något som visas på ett illustrativt sätt av Gumméus⁵⁹. Detta gäller då radiatortemperaturen regleras på traditionellt vis med ett konstant sekundärflöde.

4.3.1 Optimerad radiatorstyrning

Om styrningen av värmesystemets värmeavgivning inte begränsas till att endast reglera framledningstemperaturen utan även inkludera reglering av flödet till radiatorerna (m_s) kan temperaturverkningsgraden på radiatorväxlaren ökas och optimeras för alla värmelaster.

Redan för 20 år sedan konstaterade Frederiksen och Wollerstrand⁶⁰ att:

“In all cases of heat exchanger design, at all heat loads, and at all primary forward temperatures, an optimal flow-rate exists in the radiator circuit, i.e. a theoretical value giving a minimum return temperature on the primary side”.

(“För alla värmeväxlartyper och värmelaster, och för alla primära framledningstemperaturer finns ett optimalt flöde i radiatorkretsen, dvs. ett teoretiskt värde som ger en lägsta primär returtemperatur”)

Genom att kombinera ekvation (4) och (5) är det möjligt att finna den kombination av sekundär framledningstemperatur och flöde som ger den lägsta möjliga primära returtemperatur för godtycklig värmelast och primär framledningstemperatur.

Med modern teknik är det möjligt att utnyttja denna kunskap och reglera värmeavgivningen genom kontroll av både framledningstemperaturen till radiatorerna och flödet genom dessa tack vare en varvtalsreglerad cirkulationspump. I Artikel I beräknas den primära returtemperaturen för denna typ av reglering. Utöver beräkningar beskrivs ett fältexperiment där flödet till radiatorerna sänkts stegvis och hur den primära returtemperaturen påverkas av detta, samtidigt som värmeavgivningen från radiatorerna hålls konstant. Utifrån en sådan metod kan sedan en adaptiv reglerstrategi utvecklas för att automatiskt finna optimalt driftsläge för varje värmelast och primär framledningstemperatur. Beräkningarna i Artikel I påvisar att det genom en optimerad radiatorstyrning är möjligt att sänka medelvärdet för den

⁵⁸ Wollerstrand, J., 1993

⁵⁹ Gumméus, P., 1989

⁶⁰ Frederiksen, S., Wollerstrand, J., 1987

årliga primära returtemperaturen för en fjärrvärmeansluten byggnad med flera grader. Om byggnaden har överdimensionerat värmesystem och överdimensionerad fjärrvärmecentral sjunker returtemperaturen ytterligare. Överdimensionering av både värmesystem och fjärrvärmecentraler är vanligt förekommande i befintliga anläggningar.

I ett pågående projekt vid vår fjärrvärmegrupp implementeras just nu en adaptiv metod för att minimera den primära returtemperaturen för några flerbostadshus i Karlshamn. Fjärrvärmecentralerna i Karlshamn är utrustade med datoriserad styrning av bland annat sekundär framledningstemperatur och flöde. Styrningen kan mjukvarumässigt programmeras och direktövervakas. Den styrning som används i Karlshamn ingår även i ett annat projekt vid Blekinge Tekniska Högskola, och är beskriven av Johansson⁶¹.

4.4 Primärtemperaturens inverkan på ett kraftvärmeverk

Fjärrvärme kan produceras i en uppsjö av olika produktionsenheter som använder olika typer av bränslen och tekniker för värmeframställningen. Ofta förespråkas en kombinerad produktion av både värme och elektricitet i kraftvärmeverk (CHP). Idag produceras ca 35% av all svensk fjärrvärme i CHP och den samtidiga elproduktionen motsvarar nästan 10% av total elanvändningen år 2008⁶². Vilken andel av den nationella elproduktionen som kommer från CHP varierar kraftigt mellan olika nationer, dels beroende på utbyggnad av fjärrvärme, dels beroende på lokala och politiska förutsättningar. Ur ett internationellt perspektiv kan nämnas att andelen el från CHP är ca 10% i USA och drygt 10% i Tyskland⁶³. De länder med störst andel CHP i den nationella elmixen är Danmark (50%), Finland (40%) och Ryssland (30%)⁶⁴. De länder med en hög andel el producerad i CHP-anläggningar har en sak gemensam; de har alla ett stort fjärrvärmeunderlag. Inom den Europeiska Unionen finns ett direktiv⁶⁵ med en klar strävan att utöka elproduktionen från CHP. Argumentet för detta är främst att totalverkningsgraden för ett CHP-verk är betydligt högre än för ett kondenskraftverk där endast el produceras.

Ett CHP anslutet till ett fjärrvärmesystem kan vara konfigurerat på många olika sätt. Här koncentreras undersökningen på en mottrycksanläggning med fjärrvärmenätet som enda värmesänka. Detta innebär att driften av CHP-anläggningen är totalt beroende av de temperaturer och den varmelast som finns i fjärrvärmenätet, se Figur 9. Det finns flera andra förekommande konfigurationer av CHP. Ett exempel på alternativ konfiguration är möjligheten till ytterligare kondensering med exempelvis havsvatten. Detta ökar anläggningens elutbyte och årliga driftstimmar. Ett annat exempel på förekommande CHP-teknik är införande av återupphettare i ångcykeln för att öka elutbytet.

⁶¹ Johansson, C., 2010

⁶² Energimyndigheten, Energiindikatorer 2010, 2010

⁶³ IEA, 2009

⁶⁴ IEA, 2009

⁶⁵ The European parliament and the council of the European union, Directive 2004/8/EC, 2004

Modellen av CHP-verket som använts i Artikel VI är beskriven av Genrup⁶⁸ och Truedsson⁶⁹. Beräkningarna för CHP-verket är utförda i beräkningsprogrammet IPSEpro[®] som är ett statiskt, ekvationsbaserat beräkningsprogram för design och utvärdering av olika typer av kraftvärmeprocesser. Resultaten från beräkningarna är vidare analyserade i Matlab[®].

4.5 Primärtemperaturpåverkan på primärenergifaktorer för fjärrvärme

För att utvärdera nyttan med sänkta fjärrvärmemetemperaturer har dess påverkan på PEF för fjärrvärme beräknats. Beräkningarna gäller för ett fjärrvärmesystem där värmeproduktionen baseras på ett CHP-verk samt separata värmepannor för spets- och sommarlast. (CHP-verket är beskrivet i Artikel VI.) Beräkningarna av de förändrade PEF för fjärrvärme är utförda där primärtemperaturerna sänks enligt två tidigare presenterade metoder:

1. Implementering av optimerad radiatorstyrning
2. Implementering av radiatorfläktar.

Resultaten av denna PEF analys är presenterad i Artikel IX. Primärenergifaktorn för fjärrvärmens är beräknad med ”power bonus metoden”, tidigare beskriven i avsnittet ”Fjärrvärme och primärenergibegreppet”.

De primärenergifaktorer för insatt bränsle som används i Artikel IX är hämtade ur EN 15603:2008 standarden⁷⁰ förutom PEF för den nordiska elmixen som är beräknad utifrån statistik från⁷¹.

Beräkningen av sänkta primärtemperaturer då radiatorfläkt används är gjorda för två olika fläkthastigheter, en med en elanvändning på 1% av värmeavgivningen vid DUT, och en med 0,1%. För varje fläkthastighet utförs beräkningen för två olika reglerstrategier: 1) fläkten i drift under hela uppvärmningssäsongen; 2) fläkten endast i drift då dess elkonsumtion understiger den ökade elproduktionen som de sänkta primärtemperaturerna medger.

Resultaten visar att PEF för fjärrvärme är starkt beroende på vilken elektricitet som den i CHP-verket produceras antas ersätta. Med ett marginalesperspektiv, det vill säga att den producerade elen antas ersätta el producerad i kolkondenskraftverk, kan PEF för fjärrvärme sänkas med 25-40% då radiatorfläktar används. Detta gäller då både den primära framlednings- och returledningstemperaturen sänks och den extra elanvändningen som fläktdriften medför ej beaktas.

Om den ökade elanvändningen som fläktarna står för beaktas, kan PEF för fjärrvärme fortfarande sänkas med 20-25% förutsatt att fläktarna endast är i drift då de är nyttiga ur ett elproduktionsperspektiv. Denna driftsstrategi är särskilt viktig för den högre fläkthastigheten, som använder mera el.

⁶⁸ Genrup, M., 2005

⁶⁹ Truedsson M., 2004

⁷⁰ European Committee for Standardization, 2008

⁷¹ Dones, R. et al, 2007

Om den substituerade elektriciteten antas vara producerad som den europeiska elmixen minskar påverkan på PEF för fjärrvärme till några få procent. För den Nordiska elmixen är påverkan på PEF för fjärrvärme ännu mindre.

Om den primära returledningstemperaturen och primärflödet minskas medan framledningstemperaturen lämnas oförändrad påverkas PEF för fjärrvärme inte i samma utsträckning som i föregående fall. Dock kan PEF för fjärrvärme fortfarande minska med ca 5% om den substituerade elektriciteten behandlas med ett marginalelspektiv. Dessa resultat kan uppnås antingen med radiatorfläktar eller med optimerad radiatorstyrning.

5 FJÄRRVÄRMENS TILLFÖRLITLIGHET

Tillförlitligheten av värmeförsörjning från fjärrvärme har undersökts i flera tidigare studier. Slutsatsen är att fjärrvärme generellt kan betraktas som ett tillförlitligt värmeförsörjningssystem, se exempelvis Energimyndigheten m.fl.⁷²,⁷³ och⁷⁴. Trots detta kan naturligtvis fel inträffa som stör värmeförsörjningen. Elavbrott är ett exempel på ett externt fel som påverkar värmeförsörjningen från fjärrvärme. Nästan alla värmeförsörjningssystem är beroende av elektricitet på ett eller annat sätt för att fungera korrekt. Då elberoendet för fjärrvärme diskuteras poängterar Werner⁷⁵ vikten av att minska dess elberoende.

5.1 Fjärrvärmens elberoende

I ett fjärrvärmenät används elektriska pumpar för att distribuera värme och upprätthålla tillräckligt differenstryck. I en fjärrvärmeansluten byggnad används elektricitet i pumpar för värmedistribution och i reglerutrustning för ventilstyrning i fjärrvärmecentralen. Ett undantag är byggnader som är direktanslutna till fjärrvärmenätet där elektrisk cirkulationspump ersätts av strålpump (jet-pump). En strålpump utnyttjar differenstrycket i fjärrvärmenätet för att distribuera värmen i den anslutna byggnaden⁷⁶. Denna typ av pumpar är fortfarande vanligt förekommande i Ryssland och Östeuropa⁷⁷, men även på andra håll i Europa, t.ex. i Österrike⁷⁸. Strålpumpen är även undersökt för svenska förhållanden av Olsson⁷⁹.

De senaste årens kraftiga oväder har bidragit till en ökad fokusering på trygg el- och värmeförsörjning. I Sverige har särskilt stormen Gudrun som drabbade Sverige januari 2005 med flera långvariga elavbrott till följd bidragit till denna ökade fokusering. I kölvattnet efter stormen Gudrun har ett flertal rapporter och utredningar kring det svenska el- och värmesystemets sårbarhet levererats, se Artikel IV och rapporten ”Fjärrvärme vid elavbrott – slutrapport”⁸⁰ för en översikt av relevant litteratur.

Vid omfattande och långvariga störningar på energisystemet är det särskilt viktigt att trygga värmeförsörjningen i bostadsbebyggelsen, speciellt vid kalla väderförhållanden. I Sverige där en majoritet av befolkningen bor i fjärrvärmevärmda

⁷² Energimyndigheten, 2007

⁷³ Skagestad, B., Mildenstein, P., 2002

⁷⁴ International District Energy Association, 2005

⁷⁵ Werner, S., Sköldberg, H., 2007

⁷⁶ Olsson, L., 2001

⁷⁷ Malafeev, V. A., Schuricht, W., 2002

⁷⁸ SBZ, 2000

⁷⁹ Olsson, L., 2001

⁸⁰ Lauenburg, P., Johansson, P.-O., 2008

fatigheter är elberoendet för fjärrvärme en viktig fråga. Genom att trygga värmeförsörjningen vid långvariga elavbrott kan både evakuering av bostäder och kostamma frostsador i byggnader undvikas eller åtminstone fördröjas. I projektet ”Fjärrvärme vid elavbrott”⁸¹ undersöktes fjärrvärmeanslutna byggnaders möjlighet att ta emot värme vid elavbrott. Resultat från projektet är presenterade i Artikel II, Artikel III och Artikel IV. Projektet utfördes av författaren till denna avhandling tillsammans med Patrick Lauenburg. Resultaten från projektet var även en viktig del av Lauenburgs⁸² avhandling.

5.1.1 Självcirkulation i värmesystem vid elavbrott

Vid elavbrott upphör värmesystemets cirkulationspump och styrsystem att fungera. Värmesystemets styrventil stannar dock normalt i sin tidigare position, vilket innebär att det fortfarande finns primärflöde genom radiatorväxlaren. Styrventilen för tappvarmvattenberedning är däremot av självstängande typ för att undvika skållningsrisk av tappvarmvatten med hög temperatur.

Fram tills nyligen var den allmänna åsikten att ett elavbrott även innebar att de fjärrvärmeanslutna byggnadernas värmesystem miste sin förmåga att ta emot värme då en fungerande cirkulationspump saknas. Man har då förbisett att äldre tiders värmesystem ofta var byggda för självcirkulation. Självcirkulation uppstår på grund av densitetsskillnader mellan varmt och kallt vatten. Det varma vattnet stiger från värmekällan för att sedan sjunka när det avsvalnats i radiatorerna. Typiskt för värmesystem med självcirkulation är generösa rördimensioner och låga tryckfall samt en begränsad horisontal utsträckning⁸³.

Moderna värmesystem som är dimensionerade för pumpdrift har betydligt mindre rördimensioner vilket leder till ökade tryckfall i värmedistributionssystemet jämfört med ett värmesystem dimensionerat för självcirkulation. I en tidigare undersökning⁸⁴ där tappvarmvattencirkulationen (VVC) undersöktes upptäcktes dock att nattetid, då cirkulationspumpen var avstängd i energibesparingssyfte, uppstod självcirkulation i VVC-systemet. Detta trots att små rördiametrar användes i VVC-systemet. I detta fall var självcirkulationen oavsiktlig och oönskad, och berodde på en läckande styrventil för tappvarmvattenberedningen.

I projektet ”Fjärrvärme vid elavbrott” visade det sig att självcirkulation även kan uppstå i moderna värmesystem. I begreppet moderna värmesystem innefattas även ettrörsystem, som ofta kännetecknas av små rördimensioner och höga tryckfall. Självcirkulation kunde även påvisas i ett fall där en fjärrvärmecentral försörjde två byggnader med värme genom långa nergrävda horisontala rör.

Vilken andel av den ursprungliga värmeförsörjningen som en byggnad kan mottaga beror på en rad olika faktorer såsom byggnadsår och konstruktion av värmesystem

⁸¹ Projektet Fjärrvärme vid elavbrott pågick mellan 2007 och 2008. Projektet resulterade i en slutrapport: ”Fjärrvärme vid elavbrott – Slutrapport” (Lauenburg, P., Johansson, P.-O., 2008)

⁸² Lauenburg, P., 2009

⁸³ Paulsson, G., Elvin, H., Theorell, A., 1940

⁸⁴ Johansson, P.-O., 2007

och fjärrvärmecentral. Dock har självcirkulation påvisas i samtliga undersökta flerbostadshus och förmågan att mottaga värme uppgick till mellan 40 och 90% av den ursprungliga värmelasten trots att varken fungerande cirkulationspump eller aktiv radiatorstyrning fanns. I Artikel IV presenteras resultaten från avbrottsstudien mera ingående.

Även om resultat från Artikel IV och *Fjärrvärme vid elavbrott – Slutrapport*⁸⁵ pekar på goda förutsättningar för självcirkulation i byggnaders värmesystem vid elavbrott finns det ett antal hinder som motverkar självcirkulation. I Artikel II har några sådana hinder identifierats och dess effekt diskuterats.

För att undersöka möjligheten för självcirkulation vid varierande yttre förutsättningar såsom utomhustemperatur och primärtemperatur har även elavbrott simulerats för en byggnadsmodell med radiatorsystem. Simuleringarna är utförda med programvaran Simulink[®]. Se Artikel III för resultat och beskrivning av simuleringsmodellen.

När vi talar om en fjärrvärmeansluten byggnads möjlighet att ta emot värme vid ett elavbrott är det en absolut förutsättning att primärflödet och differenstrycket i fjärrvärmesystemet bibehålls. En grundläggande förutsättning för den enskilda byggnaden är att fjärrvärmecentralen är placerad lågt i värmesystemet och att byggnadens värmesystem har en viss höjd.

En alternativ metod för att upprätthålla värmedistributionen i en byggnad vid elavbrott är användande av turbinpumpar. Denna teknik är beskriven av Frederiksen⁸⁶ och kan vara lämplig för byggnader där upprätthållande av den interna värmedistributionen är särskilt viktig och förutsättningen för självcirkulation är begränsade eller saknas.

⁸⁵ Lauenburg, P., Johansson, P.-O., 2008

⁸⁶ Frederiksen, S. et al., 2008

6 AVSLUTANDE DISKUSSION

6.1 Sänkta primärtemperaturer

I denna avhandling har tre metoder för att sänka de primära temperaturerna undersökts:

- Ökad värmeavgivning från radiatorer genom användning av radiatorfläktar
- Optimerad radiatorstyrning
- Alternativa kopplingsprinciper i fjärrvärmecentralen

Dessa tre metoder är alla lämpliga för att sänka primärtemperaturer för den befintliga bebyggelsen och fjärrvärmenät då de endast kräver mindre eller begränsade ingrepp i de hydrauliska värmesystemen.

Den första metoden är att öka den konvektiva värmeöverföringen från en radiator genom att den kompletteras med fläktar för ökad luftcirkulation. Fältundersökningar (Artikel VII) och simuleringar (Artikel VIII) visar att värmeavgivningen kan ökas med upp till 60% då radiatorer kompletteras radiatorfläkt och radiatorfläktens elanvändning uppgår till 1% av värmeavgivningen vid DUT. Om fjärrvärme produceras i CHP kan den extra elanvändning som fläktarna ger upphov till kompenseras för genom den ökade elproduktionen som de lägre primära temperaturerna möjliggör. Detta gäller för större delen av uppvärmningssäsongen.

Genom att reglera på framledningstemperaturen och flödet till radiatorerna i ett värmesystem kan den kombination av radiatortemperatur och flöde ställas in som ger den lägsta möjliga primära returtemperaturen för en godtycklig värmelast och primär framledningstemperatur. Denna optimerade radiatorreglering bygger på det faktum att temperaturverkningsgraden för en värmeväxlare och värmesystem inte är konstant, utan beror på en kombination av flöden och temperaturer. Resultatet från en sådan optimering har beräknats i Artikel I. Utnyttjande av en optimerad radiatorstyrning ger särskilt goda resultat för överdimensionerade värmesystem, något som är vanligt förekommande framförallt i äldre bebyggelse.

Den sista undersökta metoden för att sänka primärtemperaturer är inverkan av alternativa kopplingsprinciper. Med alternativa kopplingsprinciper för fjärrvärmecentralen kan den primära returtemperaturen sänkas flera grader på årlig basis i vissa fall. En jämförelse mellan fyra olika kopplingsprinciper, varav två är traditionella parallell- och 2-steps kopplingar, och de andra är två olika typer av kaskadkopplade fjärrvärmecentraler, har utförts i Artikel V. Särskilt stor är nyttan med de kaskadkopplade fjärrvärmecentralerna för byggnader med lågtemperaturvärmesystem och/eller med en låg tappvarmvattenanvändning. Trots att de alternativa kopplingsprinciperna alltid är de som ger de lägsta primära returtemperaturerna är det idag många fjärrvärmeföretag som förespråkar de enklare parallellkopplade fjärrvärmecentralerna.

6.2 Primärenergifaktorer för fjärrvärme

Storleken på PEF för fjärrvärme beror på vilka energibärare som används och med vilken teknik som värmen produceras i ett specifikt fjärrvärmesystem. Vid kraftvärmeproduktion drar PEF för fjärrvärme stor nytta av den samtidigt producerade elen, detta speciellt om ett marginalesperspektiv används. I Artikel IX är PEF för fjärrvärme beräknade för ett specifikt fjärrvärmesystem där värmen produceras i ett kraftvärmeverk och med bibränsleeldade värmepannor. Beräkningarna görs med ”power bonus metoden” som finns beskriven i den Europeiska standarden EN 15316-45⁸⁷. Beräkningarna bekräftar att storleken på PEF är starkt beroende på hur den samtidigt producerade elen allokeras.

Ett fjärrvärmesystem där primärtemperatursänkningen sker genom extra elanvändning är ett specialfall där även den extra elanvändningen bör ingå för beräkning av PEF för fjärrvärme. Utnyttjande av radiatorfläktar är ett sådant fall. Med radiatorfläktar kan fjärrvärme PEF sänkas med 20% om ett marginalesperspektiv används för den el som produceras i kraftvärmeverket. Om den producerade elen istället antas ersätta el producerad enligt ett europeiskt genomsnitt är den möjliga sänkningen av PEF för fjärrvärme mindre än 10%, och med en nordisk elmix är sänkningen endast ett fåtal procentenheter.

Om PEF för fjärrvärme skall komma att användas som ett verktyg för fastighetsägare vid val av värmesystem behövs tydliga och standardiserade beräkningsmetoder för PEF för fjärrvärme, både för system med och utan CHP. PEF faktorer för fjärrvärme kan, om de är lokala för ett specifikt system, användas för marknadsföring för fjärrvärme gentemot andra uppvärmningssystem. Om PEF skall kunna användas på detta sätt krävs dock att allmänheten stödjer och förstår konceptet.

Vikten av att använda lokala, och inte nationella, värden på PEF för fjärrvärme måste understrykas. Detta då PEF för fjärrvärme varierar med stor magnitud för olika fjärrvärmesystem.

6.3 Elberoende i fjärrvärmvärmda byggnader

Vanligtvis bedöms fjärrvärme som en robust och tillförlitlig värmekälla. Detta även om både distributionen i fjärrvärmenätet och i de anslutna byggnaderna är beroende av elektricitet för sin funktion. Då projektet ”Fjärrvärme vid elavbrott” initierades 2007 fanns det inom branschen viss skepticism angående möjligheten att i de anslutna byggnaderna kunna ta emot värme tack vare självcirkulation. Detta då moderna värmesystem har betydligt högre tryckfall i rörledningar etc. än de äldre systemen byggda för självcirkulation. Användande av små rördimensioner och värmeväxlare bidrar till ökat flödesmotstånd. Trots detta har både flera fältförsök och beräkningar visat att självcirkulation är möjlig i moderna uppvärmningssystem.

Genom att de fjärrvärmeanslutna byggnaderna har möjlighet att ta emot värme utan elektricitet ökar förutsättningen för ö-drift av elnätet med CHP-teknik där fjärrvärmesystemet utgör den enda värmesänkan.

⁸⁷ European Committee for standardization, 2007

Det kan tyckas att utnyttjande av radiatorfläktar är i konflikt med ambitionen att minska fjärrvärmens elberoende, då elektricitet är en förutsättning för fläktdrift. Vid ett eventuellt elavbrott upphör givetvis fläkten att fungera, men radiatoren finns kvar och kommer att avge värme precis som en traditionell radiator. Självklart kommer inomhustemperaturen att sjunka, men inte lika hastigt som om värmesystemets funktion helt skulle upphöra. Det har vistats att även en liten värmeförlust kan undvika kostsamma frysskador på värmesystemet och att tiden tills en kritisk inomhustemperatur då evakuering är nödvändig kan förlängas.

6.4 Kavitation i styrventiler

Att kavitation i styrventiler kan förekomma under de förutsättningar som finns i många svenska fjärrvärmesystem fastslogs i den experimentella undersökningen av styrventilers kavitationsbenägenhet. Kavitation uppstår främst vid höga öppningsgrader i ventilen i kombination med höga differenstryck och höga temperaturer. Att kavitation inte anses som ett generellt problem inom fjärrvärmebranschen kan förklaras med att förekomsten av överdimensionerade av styrventiler är hög.

7 FÖRESLAGNA FORTSATTA STUDIER

7.1 Radiatorfläktar

Prestandan för den undersökta radiatorfläkten kan höjas genom förbättrad design. Luftflödet borde distribueras jämt längs hela radiatorytan. I detta sammanhang vore tangentialfläktar antagligen bättre lämpade för ändamålet än de axialfläktar som användes.

Då fläktarnas elanvändning är avgörande för den nytta som radiatorfläktar ger i fjärrvärmesammanhang är det intressant se om elanvändningen kan minskas. Ett sätt att göra detta är att utnyttja lokalt producerad elektricitet. Två enkla uppslag kan undersökas: el producerad i elektrotermiska element och el från solceller.

Den första metoden, där man utnyttjar en temperaturdifferens för elproduktion för fläktdrift, finns redan tillämpad kommersiellt. Caframo[®] marknadsför idag produkten Ecofan⁸⁸ som är en elektrotermisk fläkt för placering på en vedkamin. I detta fall är naturligtvis den tillgängliga temperaturdifferensen större än i radiatorsammanhang. Det finns dock ett Tjeckiskt företag som i sin produktkatalog⁸⁹ redan har en standard fläktkonvektor där fläkten drivs med termoelektrisk effekt.

Det andra uppslaget, att använda solceller för att driva fläktarna är också realistiskt, men har nackdelen att fläktarna blir beroende av ljus för sin funktion, i alla fall om det saknas möjlighet att lagra den producerade elektriska energin. Fläktar drivna med solceller finns idag på marknaden för att öka ventilationen i bilar, husvagnar och båtar.

I denna avhandling är den ökade värmeavgivningen då radiatorfläktar används endast undersökt för två enkla radiator typer. Det vore intressant att undersöka hur värmeavgivningen för andra radiator typer påverkas av ökat luftflöde.

För att säkerställa fjärrvärme position i Sverige som det vanligaste uppvärmningssättet för flerbostadshus måste nya marknader undersökas. En sådan marknad är fjärrkyla. Det är högst troligt att efterfrågan på komfortkyla i bostadshus kommer att öka. Dock är det ofta mycket kostsamt att installera ett kylsystem i en befintlig byggnad. Om istället det befintliga värmesystemet kan användas även för kyl drift kan kostnaden för installation av kyla sänkas. I Sverige finns det minst två byggnader där radiatorer används eller har använts för kyla^{90,91}. På samma sätt som radiatorfläktar ökar värmeavgivningen från en radiator kommer de att öka kylförmågan från densamma. Denna typ av lösning kan vara en stor fördel på den konkurrensutsatta kyl- och värmemarknaden.

⁸⁸ Caframo Limited, hemsida, besökt 2010-10-29

⁸⁹ Minib s.r.o., Produktkatalog, 2010

⁹⁰ Berggren, C., Personlig kommunikation, 2010-10-13

⁹¹ Löfstedt, L., Personlig kommunikation, 2011-04-08

7.2 Optimerad radiatorstyrning

Den optimerade radiatorstyrningen är för närvarande i slutfasen av ett utvecklingskede. Fjärrstyrda fältexperiment utförs i Karlshamn där en adaptiv radiatorreglering implementeras för att finna den lägsta möjliga primära returtemperaturen oberoende av aktuellt värmebehov och primär framledningstemperatur. Detta projekt utförs vid vår institution i Lund.

8 REFERENSER

- A-Energi AB, hemsida: <http://elementflakten.jetshop.se/>, besökt 2010-12-16
- Adalberth, K., Wahlström, Å.: *"Energibesiktning av byggnader- Flerbostadshus och lokaler"* Swedish Standards Institute, SIS, Stockholm, 2009
- Andersson, T., Göransson, P., Wiberg, G., Reybekiel, B.: *"Kirunametoden – för god energihushållning"* SABO, 1988
- Arvastson, L., Wollerstrand, J.: *"On sizing of domestic hot water heaters of instantaneous type"* 6th International Symposium on Automation of District Heating Systems, Reykjavik, Iceland, 1997
- Axby, F., Gustafsson, J.-O., Nyström, K., Johansson, K.: *"Studie av rökgaskondensering för biobrännseeldade kraftvärmeanläggningar"* Värmeforsk, Stockholm, 2000
- Berggren, C.: Personlig kommunikation, 2010-10-13
- Berner, M., Ulseth, R.: *"The primary energy concept"* 11th International Symposium on District Heating and Cooling, Reykjavik, Iceland, 2008
- Berner, M., Ulseth, R., Stang, J.: *"Primary energy efficiency and system engineering"* 12th International Symposium on District Heating and Cooling, Tallinn, Estonia, 2010
- Boverket: *"Regelsamling förbyggande, BBR"* Karlskrona, 2008
- Boverket: *"EU-direktivet om byggnaders energiprestanda – konsekvenser och behov av förändringar i det svenska regelverket"* Boverket, Karlskrona, 2010
- Boverket: *"Konsekvensutredning - Revidering av avsnitt 9 Energihushållning i Boverkets byggregler, BBR (BFS 1993:57), Remiss"* Boverket, Karlskrona, 2010, downloaded from http://www.boverket.se/Global/Om_Boverket/Dokument/diarium/Remisser/energi_hushallning/Konsekvensutredning2%20-%20Remissutskick.pdf, 2011-01-18
- Brumm, W.: *"Fragen der Temperaturspreizung"* Fernwärme international, 6. Jahrgang, Heft 3, p. 129-133, 1977
- Caframo Limited, hemsida: <http://www.caframo.com/hearth/>, besökt 2010-10-29
- Carlson, A.: *"Incitament för ökad kraftvärmeproduktion"* Fjärrsyn rapport 2009:9, Svensk Fjärrvärme AB, Stockholm, 2009
- Dones, R. et al.: *"Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries"* ecoinvent report No. 5, Paul Scherrer Institute Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007
- Energimyndigheten: *"Energiindikatorer 2010"* Eskilstuna, 2010

- Energimyndigheten: *"Energistatistik för småhus, flerbostadshus och lokaler 2008"*
ES2009:10, 2009
- Energimyndigheten: *"Energy in Sweden 2010"* Eskilstuna, 2010
- Energimyndigheten: *"Hur trygg är vår energiförsörjning? En översiktlig analys av hot, risker och sårbarheter inom energisektorn år 2006"* Rapport ER 2007:06, 2007
- European Committee for standardization: *"Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 4-5: Space heating generation systems, the performance and quality of district heating systems, the performance large volume systems, EN 15316-4-5"* European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 2007
- European Committee for Standardization: *"Energy performance of buildings. Overall energy use and definition of energy ratings, EN 15603:2008"* European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 2008
- The European Environment Agency (EEA): *"Environmental Terminology and Discovery Service (ETDS)"* http://glossary.eea.europa.eu/terminology/-concept_html?term=primary%20energy ,Hemsida, besökt 2010-11-11
- The European parliament and the council of the European Union: *"Directive 2004/8/EC of the European parliament and of the council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC"* Official Journal of the European Union, Volume 47, L 52/50, 2004
- The European parliament and the council of the European union: *"Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)"* Official Journal of the European Union, Volume 53, L 153/1, Luxembourg, 2010
- EPD Building platform: *"Implementation of the Energy Performance of Buildings Directive Country reports 2008"* European commission, Concerned action EPBD. 2008
- Frederiksen, S., Werner, S: *"Fjärrvärme – Teori, teknik och funktion"*
Studentlitteratur, Lund, 1993
- Frederiksen, S., Wollerstrand, J.: *"Performance of district heating house station in altered operational modes"* 23rd UNICHAL congress, Berlin, 1987
- Frederiksen, S., Wollerstrand, J, Ljunggren, P.: *"Un-interrupted district heating supply in the event of an electric power failure"* 11th International Symposium on District Heating and Cooling, Reykjavik, Iceland, 2008
- Genrup, M.: *"On degradation and monitoring tools for gas and steam turbines"*
Doktorsavhandling, Värme- och Kraftteknik, LTH, Lund Universitet, 2005

- Gode, J., Hagberg, L., Särholm, E., Axelsson, U., Fejes, J.: *"Miljövärden och miljöprodukter för fjärrvärme och fjärrkyla"* Svensk Fjärrvärme AB, Rapport 2009:24, 2009
- Gumméus, P.: *"Analys av konventionella abonnentcentraler i fjärrvärmesystem"* Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1989
- IEA: *"Cogeneration and district energy – Sustainable energy technologies for today ...and tomorrow"* International Energy Agency, Paris, France, 2009
- International District Energy Association: *"IDEA Report: The district energy industry"* USA, 2005
- Joelsson, A., Gustavsson, L.: *"Perspectives on implementing energy efficiency in existing Swedish detached houses"* Energy Policy, 36, p. 84-96, 2008
- Joelsson, A., Gustavsson, L.: *"District heating and energy efficiency in detached houses of differing size and construction"* Applied Energy, 86, s. 126-134, 2009
- Johansson, C.: *"Towards Intelligent District Heating"* Licentiate thesis, School of Computing, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, 2010
- Johansson, P.-O.: *"Fjärrvärmeanslutna byggnaders värme- och varmvattensystem – samverkan, komfort och sårbarhet"* Licentiatavhandling, Energivetenskaper, LTH, Lund Universitet, 2007
- Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.: *"Kavitation i styrventiler – laboratorieundersökning"* Svensk Fjärrvärme AB, Rapport 2009:45, 2009
- Karlsson, Å.: *"Comparative Assessment of fuel-based systems for space heating"* Doktorsavhandling, Miljö- och energisystem, Lund Universitet, 2003
- Kurnitski, J.: *"Contrasting the principles of EP requirements and calculation methods in EU member states"* Rehva journal, Volume 45, Issue 4, December 2008
- Lauenburg, P., Johansson, P.-O.: *"Fjärrvärme vid elavbrott – Slutrapport"* Energivetenskaper, LTH, Lund Universitet, 2008
- Lauenburg, P.: *"Improved supply of district heat to hydronic space heating systems"* Doktorsavhandling, Energivetenskaper, LTH, Lund Universitet, 2009
- Lindkvist, H. – Walletun, H.: *"Teknisk utvärdering av gamla och nya fjärrvärmecentraler i Slagsta"* Rapport FoU 2005:120, Svensk Fjärrvärme AB, Stockholm, 2005
- Ljunggren, P., Wollerstrand, J., Frederiksen, S.: *"Cascading in District Heating Substations - - in Pursuit of Low Return Temperatures"* 9th International Symposium on District Heating and Cooling, Espoo, Finland, 2004

- Ljunggren, P.: *"Optimal och robust drift av fjärrvärmecentraler – Avkylning och egenskaper vid elavbrott"* Licentiatavhandling, Energivetenskaper, LTH, Lund Universitet, 2006
- Löfstedt, L., Före detta teknisk chef för Systembolaget AB, Personlig kommunikation, 2011-04-08
- Malafeev, V. A., Schuricht, W.: *"Fernwärme in der Russischen Föderation"* Euro Heat & Power, Technology Review 2002, 2002
- Minib s.r.o.: *"MINIB 2009/2010"* Produkt katalog, nedladdad från: http://www.minib.com/download_language/file/3/minib_en.pdf, 2010-10-29
- Olsson, L.: *"Lokala fjärrvärmesystem"* Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2001
- Paulsson, G., Elvin, H., Theorell, A.: *"Värme, ventilation och sanitet, del I"* Bokförlaget Natur och Kultur, Stockholm, 1940
- Persson, T.: *"District heating for residential areas with single-family housing – with special emphasis on domestic hot water comfort"* Doktorsavhandling, Värme- och kraftteknik, LTH, Lund Universitet, 2005
- Pyrox: *"FLK"* Produkt katalog, nedladdad från: <http://www.pyrox.se/pdf/FLK.pdf>, 2010-12-16
- Radiator Booster, hemsida: <http://www.radiatorbooster.com/>, besökt 2011-04-05
- Råberger, L.: *"Effektivisering av abonnentcentraler i fjärrvärmenät"* Licentiatavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1995
- SABO: *"Miljövärdering av energianvändningen i ett fastighetsbestånd"* SABO, Sveriges allmännyttiga bostadsföretag, 2010
- SABO: *"Bilaga 4 Primärenergifaktorer för fjärrvärmenäten i Sverige 2008"* nedladdad från: http://www.sabo.se/SiteCollectionDocuments/-Miljovardering_bilaga4.pdf, 2010-11-10
- SBZ: *"Strahlpumpe bietet großes Einsparpotential"* sbz, 12/2000, s. 100-103, Germany, 2000
- SIS: *"What is SIS?"* hemsida: <http://www.sis.se/DesktopDefault.aspx?tabId=21>, hemsida, besökt 2011-01-18
- Skagestad, B., Mildenstein, P.: *"District heating and cooling connection handbook"* International Energy Agency IEA District Heating and Cooling, Programme of Research, Development and Demonstration on District Heating and Cooling, 2002
- Statistiska Centralbyrån: *"Nybyggnad av lägenheter i flerbostadshus resp. småhus"* hemsida: http://www.scb.se/Pages/TableAndChart____19985.aspx, besökt 2011-01-21

- Svensk författningssamling: ”Lag om energideklaration för byggnader” SFS 2006:985, downloaded from <http://62.95.69.3/SFSdoc/06/060985.PDF>, 2010-11-05
- Svensk Fjärrvärme: ”Fjärrvärmecentralen, Kopplingsprinciper” Rapport 2009:3, 2009
- Svensk Fjärrvärme: ”LAVA-kalkyl” nedladdad från: <http://www.svenskfjarrvarme.se/Medlem/Fokusomraden-/Kundanlaggningar/Berakningsprogram/>, 2011-01-10, Rapport 2009:50
- Truedsson M., 2004: ”Systemstudie av Västhamnsverket i Helsingborg” Thesis for the degree of Masters in Science, Lund Inst of Technology, Lund 2004
- Trüschel, A.: ”Värmesystem med luftvärmare och radiatorer –En analys av funktion och prestanda” Licentiatavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige, 1999
- Volla, R., Ulseth, R., Stang, J., Frederiksen, S., Johnson, A., Besant, R.: ”Efficient substations and installations” Report 1996:N5, International Energy Agency IEA District Heating and Cooling, Programme of Research, Development and Demonstration on District Heating and Cooling & NOVEM, Sittard, 1996
- Werner, S., Sköldberg, H.: ”Fjärrvärmens omvärld – beskrivning av kunskaps- och forskningsläge” Svensk Fjärrvärme AB, Rapport 2007:4, 2007
- Werner, S.: ”Nytta med svensk fjärrvärmeforskning” Rapport FoU 2004:9, Svensk Fjärrvärme AB, Stockholm, 2004
- Wollerstrand, J.: ”Fjärrvärme - abonnentcentraler med genomströmningsberedare för tappvarmvatten” Licentiatavhandling, Värme- och kraftteknik, LTH, Lund Universitet, 1993
- Zinko, H., (editor) et al.: ”Improvement of operational temperature differences in district heating systems” Report Annex VII I 2005:8 DHC-05.03, International Energy Agency IEA District Heating and Cooling, Programme of Research, Development and Demonstration on District Heating and Cooling & NOVEM, Sittard, 2005

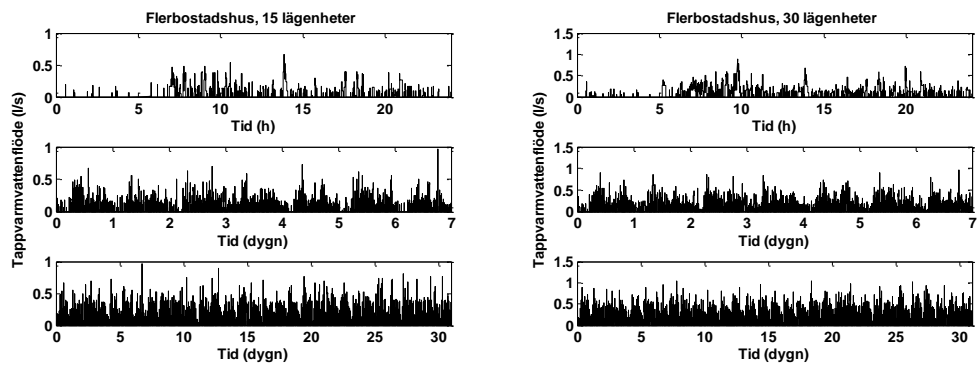
BILAGA 1 – Tappvarmvattenmönster för flerbostadshus

Denna bilaga visar de användningsmönstren för tappvarmvatten som använts för primärtemperaturberäkningar i Artikel V.

Användningsmönstren för tappvarmvatten är simulerade med ett datorprogram som utvecklats av Wollerstrand. Programmet baseras på en statistisk modell som är presenterad av Arvastson och Wollerstrand (1997).

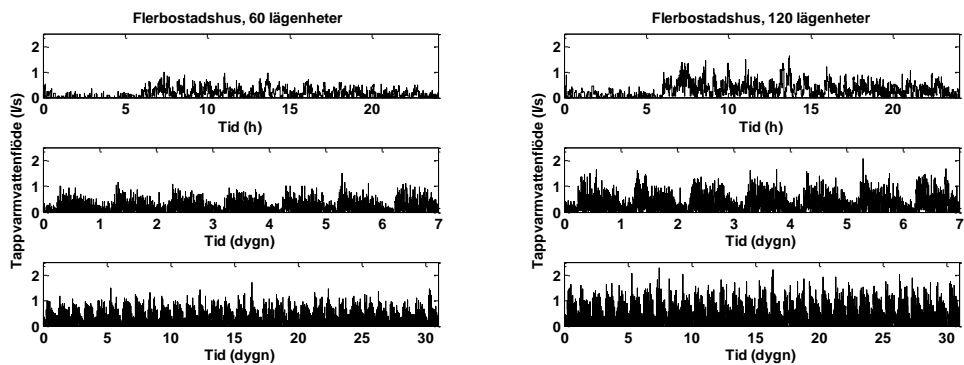
Den simuleringsalgoritm som används för tappvarmvattenanvändningen är baserad på detaljerade svenska fältmätningar av S. Holmberg. Modellen baseras på oberoende statistiska sannolikhetsmodeller för förekomst av varmvattenanvändning, tappstorlek och tapplängd. Den statistiska modellen är av typen Monte Carlo simulering, där jämt fördelade oberoende händelser simuleras.

Den genomsnittliga tappvarmvattenanvändningen är 183 l/dygn och lägenhet (oberoende av byggnadens storlek). I Figur 1 och 2 är tappvarmvattenanvändningen för fyra olika flerbostadshus plottad för tidsperioder av 24 timmar, en vecka och 31 dygn. Storleken på de fyra flerbostadshusen motsvarar: 15, 30, 60 och 120 lägenheter.



Figur 1: Tappvarmvattenanvändningsmönster för flerbostadshus med 15 lägenheter (till vänster) och 30 lägenheter (till höger).

Figure 1: Domestic hot water consumption for building with 15 apartments (left) and 30 apartments (right)



Figur 2: Tappvarmvattenanvändningsmönster för flerbostadshus med 60 lägenheter (till vänster) och 120 lägenheter (till höger).

Figure 2: Domestic hot water consumption for building with 60 apartments (left) and 120 apartments (right)

Referenser

Arvaston, L., Wollerstrand, J.: "On sizing of domestic hot water heaters of instantaneous type", 6th International Symposium on Automation of District Heating Systems, Reykjavik, Iceland, 1997



Forskning som stärker fjärrvärme och fjärrkyla, uppmuntrar konkurrenskraftig affärs- och teknikutveckling och skapar resurseffektiva lösningar för framtidens hållbara energisystem. Kunskap från Fjärrsyn är till nytta för fjärrvärmebranschen, kunderna, miljön och samhället i stort. Programmet finansieras av Energimyndigheten tillsammans med fjärrvärmebranschen och omsätter cirka 19 miljoner kronor om året. Mer information finns på www.fjarrsyn.se

TEMPERATUREFFEKTIVA FJÄRRVÄRMESYSTEM

Fjärrvärme är en riktigt bra uppvärmningsform, men kan självklart bli ännu bättre. Här presenteras en rad forskningsresultat som stärker fjärrvärmens konkurrenskraft och miljönytta.

Sänkta fjärrvärmemetemperaturer ger både tekniska och ekonomiska fördelar vid produktion och distribution av fjärrvärme. Här har man studerat tre sätt, som inte kräver omfattande och dyrbara ombyggnader, men som leder till en sänkning av temperaturen. Det handlar om adaptiv reglering, alternativa kopplingsprinciper i fjärrvärmecentralen och framgångsrika försök med radiatorfläktar.

Här sammanfattas aktuell forskning men resultatet är inte enbart teoretisk. Här får läsaren också handfasta tips om hur energieffektiviteten hos fjärrvärmesystem i befintlig bebyggelse kan förbättras. Rapporten beskriver också hur fjärrvärmedistributionen kan göras mer robust mot elavbrott. Om fjärrvärmecentraler utformas och placeras rätt kan självirkulation i fastighetens radiatorsystem rädda värmeförsörjningen under ett avbrott.

