

FJÄRRVÄRME VID ELAVBROTT – SLUTRAPPORT

Patrick Lauenburg
Per-Olof Johansson



LUNDS UNIVERSITET

November 2008
Avdelningen för Energihushållning
Institutionen för Energivetenskaper
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet
www.energy.lth.se

© Patrick Lauenburg, Per-Olof Johansson 2008

ISRN LUTMDN/TMHP--08/3037--SE
ISSN 0282-1990

Lund 2008

SAMMANFATTNING

Vårt samhälle är sårbart vid ett långvarigt elavbrott. Vid kall väderlek är avbruten uppvärmning ett av de allvarligaste hoten. Fjärrvärme finns på de allra flesta orter i Sverige och om värme kan överföras till de anslutna byggnaderna vid ett elavbrott har det stor betydelse för en trygg energiförsörjning.

I detta arbete har kunnat konstateras att det finns goda möjligheter till värmeförsörjning vid ett elavbrott genom självcirkulation i anslutna radiatorsystem, något som tidigare har förbisetts. Självcirkulation uppstår då det finns en tillräckligt stor temperaturskillnad mellan fram- och returledning i radiatorsystemet. Reglering och cirkulationspump i radiatorsystemen slutar att fungera men om fjärrvärmevatten kan fortsätta att passera genom radiatorsystemens värmeväxlare kan självcirkulation uppstå.

En förutsättning för att självcirkulation i enskilda byggnader ska kunna fungera är således att fjärrvärmenätet kan fungera vid ett elavbrott. Fjärrvärmeleverantören måste alltså ha reservkraft för att kunna upprätthålla produktion och distribution av fjärrvärme, något som inte alltid är fallet. Våra studier visar att det finns all anledning att tillgodose detta. Dessutom finns kunder som har egna reservaggregat, till exempel sjukhus, som är beroende av att fjärrvärmenätet fungerar.

Vid ett omfattande elavbrott kan det vara önskvärt att etablera ett mindre elnät, avskilt från stamnätet, genom att utnyttja lokal elproduktion. Upprättandet av ett sådant nät kräver att det finns lokala produktionsanläggningar som kan starta mot spänningslöst nät och har nödvändig reglerutrustning för frekvenshållning. I Malmö är det idag möjligt att upprätta ett sådant nät med hjälp av lokala produktionsenheter. En förutsättning är att det finns förbrukning av fjärrvärme. Det är inte ovanligt att kraftvärmeanläggningar (som producerar både el och värme) är beroende av fjärrvärmenätet för kylning till elproduktionen. Man kan utifrån resultaten också argumentera för att alla fjärrvärmenät borde ha kraftvärme för en tryggare energiförsörjning.

Resultaten visar att de allra flesta byggnader kan få självcirkulation vid ett elavbrott motsvarande 40-80 procent av uppvärmningseffekten. Tappvarmvattensystem omfattas primärt inte av detta även om viss tappvarmvattenproduktion kan vara möjlig. Självcirkulationen fungerar bättre ju högre utetemperaturen är. Dock kan de flesta byggnader, eventuellt efter vissa modifieringar, få minst 50 procent av uppvärmningseffekten vid en mycket låg utetemperatur, vilket innebär att man normalt klarar sig i flera dygn innan en eventuell evakuering blir nödvändig.

De genomförda studierna har möjliggjort att en rad rekommendationer har kunnat sammanställas. Rekommendationerna avser att öka möjligheterna till självcirkulation i olika

system och riktar sig till alla berörda parter, det vill säga från myndigheter och fjärrvärmeföretag till tillverkare, fastighetsägare, driftspersonal och boende, och innefattar både förberedande åtgärder och sådana åtgärder som kan vidtas när ett elavbrott väl har inträffat.

Avslutningsvis kan man konstatera att det bör finnas ett värde i form av att de presenterade resultaten är ett försäljningsargument för fjärrvärme och att samhällets kostnader för exempelvis reservaggregat och eventuella evakueringar kan minskas.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

NOMENKLATUR **VII**

INLEDNING **1**

PROBLEMFÖRMULERING	1
SYFTE	2
AVGRÄNSNINGAR OCH FÖRUTSÄTTNINGAR	2
ERKÄNNANDEN	2

INTRODUKTION TILL ÄMNET **3**

AVBROTT I EL- OCH FJÄRRVÄRMELEVERANS	3
VÄRME OCH SÅRBARHET, KRISHANTERING	3
ANSVARSFÖRDELNING	4
LOKAL ELPRODUKTION	4
UPPRÄTTHÅLLANDE AV FJÄRRVÄRMENÄT	5
TIDIGARE ARBETE	6

VAD HÄNDER MED VÄRMEN VID ETT ELAVBROTT? **11**

FJÄRRVÄRMENÄTET – PRODUKTIONSANLÄGGNINGAR OCH DISTRIBUTIONSNET	11
FJÄRRVÄRMECENTRALEN	12
RADIATORSYSTEMET	13
VENTILATIONSSYSTEMET	14
TAPPVARMVATTEN	15
UTKYLNING AV BYGGNADER	16
BACKUPSYSTEM	18

SJÄLVCIRKULATION **21**

MEKANISM	21
HISTORIK	22
VAD KARAKTERISERAR ETT PUMPFÖRSETT SYSTEM?	22
SJÄLVCIRKULATION I PUMPFÖRSEDDA SYSTEM	23
ERFARENHETER FRÅN LAGAN UNDER STORMEN GUDRUN	28
HINDER FÖR SJÄLVCIRKULATION	29
HINDER I FJÄRRVÄRMECENTRALEN	29
FÖRDELNING I HUS	33

VENTILATION	40
SHUNKOPPLINGAR	43
SEKUNDÄRNÄT	45
ÖVRIGA HINDER	46
RESULTATENS GENERALITET	47
SIMULERINGAR	47
FÄLTFÖRSÖKEN VID EXTREM KYLA – BERÄKNING	50
GEOGRAFISKT LÄGE	53
TAPPVARMVATTEN	54
AVKYLNING AV FJÄRRVÄRMENÄT	56
<u>VAD KAN JAG GÖRA SJÄLV?</u>	57
PRAKTISKA FÖRSÖK	57
GROV UPPSKATTNING MED HJÄLP AV TABELL	57
INFORMATION TILL BERÖRDA PARTER	57
FJÄRRVÄRMEBOLAG	58
MYNDIGHETER	58
FASTIGHETSÄGARE	58
TILLVERKARE AV FJÄRRVÄRMECENTRALER OCH VVS-KOMPONENTER	60
VID NYBYGGNATION ELLER RENOVERING	61
BRUKARE	61
<u>SLUTSATSER</u>	63
<u>REFERENSER</u>	65
<u>BILAGA A – PRAKTISKA FÖRSÖK MED SJÄLVCIRKULATION</u>	69
ALLMÄNT OM MÄTMETODIKEN	69
FELKÄLLOR	69
GENOMFÖRANDE	70
FÖRENKLAT FÖRFARANDE	70
<u>BILAGA B – BAKGRUND TILL BERÄKNINGAR</u>	73
FLÖDESFÖRDELNING VID SJÄLVCIRKULATION	73
BESKRIVNING AV SIMULERINGSMODELL	75
<u>BILAGA C – BEDÖMNING AV MÖJLIGHETER TILL SJÄLVCIRKULATION</u>	81

NOMENKLATUR

Variabler

Δ	Differens
ρ	Densitet, kg/m ³
c_p	Värmekapacitet, J/kgK
g	Tyngdacceleration, 9,81 m/s ²
h	Drivhöjd, m
k	Flödeskapacitet vid $\Delta p = 1$ bar, m ³ /h
l	Längd, m
\dot{m}	Massflöde, kg/s
p	Tryck, Pa
\dot{Q}	Värmefflöde, kW
T	Temperatur, °C
\dot{V}	Volymflöde, m ³ /h

Index

0	Höjd på källarkrets, m
1	Höjd på stammar, m
100%	Initialtillstånd
∞	Stationärt tillstånd
<i>exp</i>	Experimentell
<i>f</i>	Fram(ledning)
<i>i</i>	Inomhus
<i>p</i>	Primärsida (fjärrvärmesida)
<i>r</i>	Retur(ledning), radiator-
<i>s</i>	Sekundärsida (radiatorsida)
<i>sim</i>	Simulerad
<i>själv</i>	Själv-cirkulation
<i>stam</i>	Stam-, stigarledning
<i>u</i>	Utomhus

Förkortningar

DUC	Datorundercentral
F	Frånluft
FC	Fjärrvärmecentral
FT	Från- och tilluft

FTX	Från- och tilluft med värmeväxling
FV	Fjärrvärme
KV	Kallvatten
Rad	Radiator
S	Självdreg
SV	Styrventil
Vent	Ventilation
VV	Varmvatten

INLEDNING

Följande rapport utgör slutrapport av projektet *Fjärrvärmelast vid elavbrott*, ett av de lokala utvecklingsprojekt för privat-offentlig samverkan (UPOS) om tryggare energiförsörjning som Energimyndigheten driver. Arbetet påbörjades 2006 i ett samarbete mellan E.ON Värme Sverige AB och Lunds Tekniska Högskola med syfte att undersöka möjligheterna till att leverera fjärrvärme vid ett elavbrott. Detta resulterade i en förstudie och blev sedermera ett UPOS-projekt. En delrapport utgavs 2007.

Vid ett seminarium 2006 med namnet *Starta Malmö* diskuterades möjligheterna att trygga den lokala elförsörjningen i Malmö genom så kallad ö-drift i händelse av ett avbrott på stamnätet. Det största hotet för de som vistas i kommunen, liksom för ett antal av organisationens verksamheter, som äldreboende och andra boendeformer, utgörs av att uppvärmningen slutar fungera vintertid. Malmö stad ser det som mycket angeläget, att minska riskerna i detta avseende. Vid ett långvarigt elbortfall vintertid, skulle det uppstå omfattande svårigheter att hantera situationen för kommuninvånarna, kommunala servicefunktioner, sjukvården, m.m. Dessutom är det nödvändigt för vissa kraftvärmeverk att det finns ett värmeunderlag i fjärrvärmenätet för att kraftproduktion ska vara möjlig.

Projektet kan ses som ett pilotprojekt. Resultaten från studien är naturligtvis tänkta att kunna nyttjas av övriga kommuner, där produktion av fjärrvärme är möjlig under elavbrott.

Fjärrvärme finns i de allra flesta orter i Sverige och om värme kan överföras till de anslutna byggnaderna vid ett elavbrott har det stor betydelse för en trygg energiförsörjning. I det krisberedskapsarbete som bedrivs på olika håll, exempelvis i de olika UPOS-projekten, pekas uppvärmningen generellt ut som en mycket viktig samhällsfunktion.

I arbetet studeras möjligheterna till värmeförsörjning genom att självcirkulation uppstår i fjärrvärmeanslutna byggnader.

PROBLEMFORMULERING

I arbetet undersöks vilka möjligheter och hinder som finns för att självcirkulation i fjärrvärmeanslutna byggnaders uppvärmningssystem ska kunna uppstå. Självcirkulation är en gammal beprövad teknik som användes före det att pumpar introducerades i uppvärmningssystem. Pumpförsedda system är inte konstruerade för självcirkulation och frågan är därför i vilken omfattning självcirkulation kan uppstå och vilka hinder som kan identifieras.

SYFTE

Arbetet syftar till:

Att finna lösningar, som i så stor utsträckning som möjligt, säkerställer värmeförsörjningen för bostäder och kritiska verksamheter i kommunen, i samband med ett totalt elbortfall.

Att ta fram generella metoder, som på ett enkelt sätt kan implementeras i alla kommuner med fjärrvärmeproduktion och som kan generera värme vid bortfall av el från stamnätet.

Att ta fram systematiska metoder för olika sätt att lösa situationer, där uppvärmning inte går att upprätthålla.

Att skapa underlag för risk- och sårbarhetsanalyser inom området, för Malmö stad och andra kommuner.

AVGRÄNSNINGAR OCH FÖRUTSÄTTNINGAR

Studien är inriktad på fjärrvärme och hur denna teknik fungerar vid ett elavbrott. Någon analys av andra störningar vid ett elavbrott eller förekomsten av elavbrott studeras inte.

Tappvarmvattensystem har inte samma möjligheter till att generellt utnyttja självциркуlation för att fungera vid ett elavbrott. Funktionen hos tappvarmvattensystem hanteras endast översiktligt i detta arbete.

En fundamental förutsättning för att kunna leverera fjärrvärme vid ett elavbrott är att fjärrvärmeproduktionen kan upprätthållas. Vid studierna av självциркуlation i radiatorsystem förutsätts alltså att fjärrvärmeleverantören har reservkraft för att upprätthålla driften av fjärrvärmenätet.

ERKÄNNANDEN

Malmö stad har av Statens energimyndighet fått i uppdrag att genomföra ett utvecklingsprojekt av privat-offentlig samverkan (UPOS). Energimyndigheten är huvudfinansiär av projektet och Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för Energivetenskaper, är huvudsaklig utförare av arbetet. Övriga finansiärer och samarbetspartners är: Malmö stad, Stadsfastigheter, MKB Fastighet AB, E.ON Värme Sverige AB, Svensk Fjärrvärme AB och LTH.

Författarna vill tacka samtliga deltagare i projektgruppen: Lennart Andersson, Stadsfastigheter, Jan Berglund, Svensk Fjärrvärme, numera Mälarenergi, Conny Håkansson, Svensk Fjärrvärme, Kurt Ericsson, E.ON, Egon Lange, MKB, Jan-Peter Stål, Malmö Stad och Janusz Wollerstrand, LTH samt projektledaren Lennart Lindsjö. Tack även till Håkan Nilsson, Malmö Stad. Janusz fungerar även som handledare till Patrick och Per-Olof och har medverkat i stor utsträckning vid mätningar, beräkningar och inte minst vid uppstarten av projektet.

Vi vill även passa på att tacka Harald Andersson på E.ON som initierade projektet.

Ett särskilt tack till all driftspersonal, bovärdar, fastighetsskötare och övrig verksamhetspersonal som har gjort det möjligt för oss att genomföra alla praktiska försök.

INTRODUKTION TILL ÄMNET

Att värma byggnader för att få en acceptabel inomhustemperatur är nödvändigt på många platser i världen, så även i Sverige. Detta är något som de flesta av oss tar för givet, men ibland blir vi påmind om hur beroende vi är av att våra energisystem fungerar. Konsekvenserna av stormen Gudrun i början av 2005 var omfattande för stora delar av samhället. Dock var väderleken relativt mild och konsekvenserna för uppvärmningen var måttliga. Samtidigt belyste händelsen elberoendet i vårt samhälle, inte minst hos våra uppvärmningssystem. Det är inte bara elvärme och värmepumpar som är beroende av el utan så gott som samtliga uppvärmningssystem använder el på något vis: till cirkulationspumpar, reglerutrustning och brännaraggregat.

AVBROTT I EL- OCH FJÄRRÄRMELEVERANS

I Sverige kan man som elanvändare ansluten till ett lokalnät räkna med att drabbas av elavbrott i ungefär 100 minuter per år. 70 procent av alla elavbrott varar mellan en och sex timmar och var tionde elavbrott varar mer än sex timmar [12]. Risken för långvariga elavbrott kan generellt anses vara liten, även om det finns många exempel på allvarliga elavbrott, både i Sverige och i andra länder. Framför allt blir vi utan tvekan mer och mer sårbara och beroende av elektricitet i vårt samhälle.

Inga elkunder ska behöva ha avbrott som är längre än 24 timmar. Kommande stormar, liknande Gudrun, utgör inga undantag, däremot krig, terrorhandlingar, och naturkatastrofer såsom jordbävningar, jordskred och isstormar. [8]

I Energimyndighetens *Hur trygg är vår energiförsörjning? En översiktlig analys av hot, risker och sårbarheter inom energisektorn år 2006*, [12], nämns en del om störningar i fjärrvärmesystem. Även om större störningar förekommer får de betraktas som ovanliga. Det finns dock ingen samlad avbrottsstatistik. I rapporten påpekas att ett långvarigt avbrott kan leda till mycket svåra påfrestningar på lokalsamhället. Dels på grund av behovet av evakueringar och tillgång på värmestugor, vilka dessutom ofta är anslutna till fjärrvärmenätet, dels genom stora kostnader för eventuella frysskador på byggnader.

Värdet av icke levererad fjärrvärme till kunder – fjärrvärmecentralens felfrekvenser i fjärrvärmesystem, [34] är en finsk studie där fjärrvärmens leveranssäkerhet har studerats. Slutsatsen är att fjärrvärmens totalleveranssäkerhet är mycket bra.

VÄRME OCH SÅRBARHET, KRISHANTERING

En risk- och sårbarhetsanalys genomfördes i Malmö Stad i samband med *Starta Malmö* (som syftar till att kunna försörja kommunen med el genom ö-drift, [69]) med totalt elavbrott som utgångspunkt. Analysen visade att det största hotet för de som vistas i kommunen, liksom för ett antal av organisationens verksamheter, som äldreboende och andra boendeformer, utgörs

av att uppvärmningen vintertid slutar fungera [66]. På vissa platser i Malmö finns stationär reservkraft, exempelvis i Stadshuset, Universitetssjukhuset MAS och i pumpstationer för vatten och avlopp. Det finns även mobila elverk som är avsedda för bland annat vårdboenden och IT-drift. Just inom vård och omsorg anses värmen utgöra ett stort problem. Vid ett avbrott avser man att inledningsvis förtäta boenden men vårdtagare befaras ganska omgående att behöva flyttas till alternativa boenden. För skol- och förskoleverksamheter gäller att dessa stänger ganska omgående, speciellt vintertid. [ibid.]

Generellt i landet finns brister inom beredskapen för äldreboenden. *Krisberedskap i kommunernas socialtjänst* [47] anger att drygt 40 procent av de boende i kommunala särskilda boenden för äldre inte har någon tillgång till reservkraft. I *Redovisning av tillgången på reservkraft m.m.* [35] anges att flertalet av såväl privata som kommunala sjukhem, vårdhem, ålderdomshem och servicehus saknar reservkraft.

Ett flertal arbeten belyser problemen med uppvärmning av byggnader vid ett elavbrott, vilket kommer att behandlas i nästa kapitel.

Ansvarsfördelning

Det här arbetet går inte närmare in på vilket ansvar olika aktörer har för värmeförsörjningen. Frågan är komplex och svaret beror bland annat på om det är försörjningen på lång eller kort sikt, under normala, störda eller katastrofliknande förhållanden som avses. Ett formellt beredskapsansvar finns dock väl beskrivet för olika myndigheter som exempelvis Krisberedskapsmyndigheten, Energimyndigheten, länsstyrelser och kommuner [4]. För vidare läsning rekommenderas även *Energimyndighetens ansvar för trygg energiförsörjning*, [13] och Referenspärm med informationsmaterial, [18], som innehåller information riktad till olika aktörer om hur konsekvenser av el- och värmeavbrott kan förebyggas och lindras.

LOKAL ELPRODUKTION

Vid ett omfattande elavbrott kan det vara önskvärt att etablera ett mindre elnät, så kallad ö-drift, avskilt från stamnätet, genom att utnyttja lokal elproduktion. Detta utgör även en viktig del för återstarten av stamnätet. Upprättandet av ö-drift kräver att det finns lokala produktionsanläggningar som kan starta mot spänningslöst nät och har nödvändig reglerutrustning för frekvenshållning. [9]

Svenska Kraftnät bedriver arbete för att öka antalet platser i Sverige med möjlighet till ö-drift. Malmö är ett exempel på ett område där ett sådant förfarande idag är möjligt.

Lokal elproduktion sker ofta i kraftvärmeverk, vilket innebär produktion av både el och värme. I termiska kraftverk, med förbränning av exempelvis gas, biobränsle eller avfall, kan endast en begränsad del av bränslets energiinnehåll omsättas till mekanisk energi (el). Resterande energi förloras som värme till omgivningen om inte värmen kan tas tillvara. Tänkbara användningsområden är industriella processer eller byggnadsuppvärmning. För att värmen ska kunna värma byggnader och generera tappvarmvatten krävs ett distributionssystem i form av ett fjärrvärmenät.

En del kraftvärmeverk kan drivas som så kallade kondenskraftverk, det vill säga endast för elproduktion. Spillvärmen måste då kunna bortföras från processen, till exempel genom

kylning i ett närliggande vattendrag eller i ett kyltorn. Om ingen sådan möjlighet finns måste fjärrvärmenätet finnas tillgängligt som värmesänka.

En viktig faktor för att lyckas med ö-drift baserat på vissa typer av kraftvärmeverk är alltså att det finns avsättning för värmen till fjärrvärmenätet vid den aktuella tidpunkten.

Ett lokalt nät skulle i princip kunna innebära att alla fjärrvärmekunder har tillgång till el och därmed har en fungerande värmeförsörjning. I praktiken innebär dock ö-drift begränsad tillgång till el och att tillgänglig el kanske måste riktas till särskilt känsliga verksamheter. Den begränsade tillgången beror bland annat på vilka produktionsanläggningar som kan användas och var dessa är lokaliserade. Många produktionsanläggningar ligger i mindre tätbefolkade områden medan ö-drift framför allt är aktuellt för tätbefolkade områden.

En annan anledning är förhållandet mellan den maximalt möjliga elproduktionen och den värme som produceras. Under gynnsamma förhållanden kan detta förhållande ligga något över 0,5. Om värmelasten minskar, måste även den elproduktionen minskas. Förhållandet är dock inte konstant vid minskande värmelast utan elproduktionen minskar mycket snabbare. [9]

I *En leveranssäker elöverföring* [8] hävdas att ”om privat-offentligt gemensamma åtgärder enligt HEL-projektets inriktningsdokument hade kunnat vidtas före stormen Gudrun, är det sannolikt att färre hade drabbats genom att det vidtagits fler säkerhets- och beredskapsåtgärder på lokal nivå”. Ett exempel som ges på sådana åtgärder är just ö-drift av delar av nätet som baseras på lokal kraftvärme i kombination med styrning av tillgänglig el till viktiga verksamheter.

I augusti 2003 drabbades 50 miljoner människor i nordöstra USA av ett elavbrott. Vissa områden var strömlösa i fyra dygn. Även om fjärrvärmen är liten i USA så finns en hel del småskalig kraftvärme. Ett kraftvärmeaggregat förser då exempelvis ett universitetsområde, sjukhus, industriområde eller bostadshus med både el och värme. De flesta anläggningar är även anslutna till det allmänna elnätet. Artikeln *Experiences with Combined Heat and Power during the August 14, 2003 Northeast Blackout*, [3], redovisar en studie av hur olika kraftvärmesystem fungerade i samband med elavbrottet. De allra flesta, även anläggningar som inte var konstruerade för så kallad stand alone-drift fungerade tillfredsställande under elavbrottet. Någon större värmelast förelåg inte vid tillfället men möjligheten att upprätthålla, eller återupprätta, elförsörjningen i dessa system var av stor betydelse för att minimera konsekvenserna av elavbrottet.

UPPRÄTTHÅLLANDE AV FJÄRRVÄRMENÄT

Ska man kunna upprätthålla driften av ett fjärrvärmenät i en avbrottssituation krävs, förutom reservkraft till värmeproduktion och -distribution, att det finns avsättning för värmen i nätet. Om det inte gör det blir temperaturen på fjärrvärmevattnet i returledningen för hög (ingen avkylning av fjärrvärmevattnet hos kunderna) och värmeproduktionen måste avbrytas.

I ett sådant fall blir många avnämare, till exempel sjukhuset i Malmö, UMAS, utan värme trots att man har reservel till cirkulationspumpar och reglerutrustning. Socialstyrelsens rapport *Det robusta sjukhuset* [46] anger att endast 40 procent av landets sjukhus har någon form av reservvärme. Vidare rekommenderas att man vid en eventuell avveckling av egen

panncentral tecknar avtal om reservvärme med fjärrvärmeleverantören. Exempel på andra avnämare, som riskerar att bli utan fjärrvärmeleverans trots att reservkraft finns tillgänglig, är lokaler som är tänkta att användas som värmestugor vid ett långvarigt elavbrott [18], [29].

Möjligheterna att säkra tillgång på fjärrvärme och upprättande av ö-drift gör att man måste fastställa om självcirkulation i anslutna byggnader kan säkerställa avkylningen av fjärrvärmevattnet i ett nät.

TIDIGARE ARBETE

Det finns relativt mycket litteratur om olika frågeställningar runt leveranssäkerhet av energi och sårbarhet. Det mesta behandlar dock elektricitet, medan det finns mindre att hämta om värme, även om ämnet genererat en del skrifter, främst på senare år. Ett genomgående problem är hanteringen av frågan om vad som händer i fjärrvärmeanslutna värmesystem, som är det klart dominerande uppvärmningssättet i flerbostadshus och lokaler, vid ett elavbrott. Enstaka författare har lyft frågan om självcirkulation i värmesystemen, och att detta borde undersökas, medan de flesta nöjer sig med att konstatera att värmen inte kommer att fungera utan el.

Det senaste, mest omfattande och mest relevanta arbetet utkom i år, 2007, och heter *Säkrare Värmeförsörjning! Tillstånd, Förbättringsmöjligheter, Beredskapsåtgärder* [4]. Rapporten har sammanställts av Svenska värmeverkens ekonomiska förening (Värmek) på uppdrag av Energimyndigheten. Till exempel behandlas ämnen som ansvarsfördelning, vad som är acceptabla temperaturstörningar inomhus och för byggnader, utkylningsförlopp för byggnader, reservkraft och reservvärme. I rapporten refereras även till vår förstudie [31] och konstateras att frågan om självcirkulation bör utredas vidare.

I ett tidigare arbete sammanställt av Värmek på uppdrag av Energimyndigheten av samma författare, *Sårbarhet hos fjärrvärmeförsörjning med tonvikt på känslighet för elavbrott* [9], beskrivs situationen i Stockholm med flera olika fjärrvärmenät och en stor blandning av produktionsanläggningar. Det finns bland annat ett avsnitt som resonerar kring potentialen för självcirkulation. Slutsatsen är att det bör finnas möjlighet till viss självcirkulation som, genom att stänga av delar av radiatorsystemet, kan värma delar av en byggnad. Dock understryks vikten av att göra praktiska försök.

Om man söker sig bakåt i tiden så hittar man två utredningar, *Säker elförsörjning SOU 1984:69* [49] och *Hot- och riskutredningen SOU 1995:19* [50], som behandlar sårbarhet i energisystemet. Dåvarande Statens energiverk genomförde 1989-90 projektet *Värmeförsörjning i kristid, VIK*, [55] som behandlar kommunal beredskapsplanering. Efter Hot- och riskutredningen fick Nutek i uppdrag att fördjupa analysen med fokus på fjärrvärmesystem. Rapporten, med namnet *Värmeförsörjning vid långvariga elavbrott* [6], utkom 1998 och innehåller bland annat en enkätundersökning utförd hos svenska fjärrvärmebolag. Även om undersökningen inte är helt färsk längre märks ändå några intressanta resultat. Undersökningen visar att enbart 2 av 75 svarande företag kan leverera värme och att abonnenterna kan ta emot värme. Hälften svarade att de inte klarar ett tre dygn långt elavbrott utan frysskador på byggnader. Däremot finns reservel och värmeproduktion för att klara det egna distributionssystemet från förfrysning vid 80 procent av anläggningarna och 40 procent anser att en viss mängd värme kan levereras vid ett långvarigt elavbrott. Vidare behandlar rapporten frågor kring acceptabla temperaturnivåer,

utkylning av fastigheter, hur värmeförsörjning kan prioriteras vid begränsad tillgång på el samt reservkraft – organisatoriska, tekniska och ekonomiska aspekter. Förekomsten av reservkraft inom fjärrvärmeförsörjningen redovisas även i Krisberedskapsmyndighetens *Reservanordningar för kommunalteknisk försörjning – Erfarenheter från 18 års verksamhet med statsbidrag till kommuner* [28]. Där påpekas att det tidigare generellt inte ansetts nödvändigt bland fjärrvärmeföretagen att förse sig med reservkraft eftersom man inte haft avsättning för värmen vid ett elavbrott. Då många prioriterade kommunala fastigheter förses med reservkraft ökar möjligheten att ta emot värme. Dock anses värmeunderlaget vara begränsat och reservkraften sätts ofta in vid oljeeldade spetslastanläggningar.

I propositionen *Förändrad omvärld – omdanad försvar (prop 1998/99:74)* [42] uppmanades Energimyndigheten att arbeta för att stödja kommunerna i deras planering för krisförsörjning samt att göra en översyn över kommunernas beredskap för att upprätthålla livsnödvändig värmeförsörjning. 2001 utkom så *Kommunernas värmeberedskap. Förberedelser och lösningar för värmeförsörjning i kris* [7] som bland annat innehåller en lägesbeskrivning i kommunerna avseende värmeförsörjning. 226 kommuner deltog i en enkätundersökning. Resultaten visade att ungefär hälften har någon form av åtgärdsplan att följa vid ett långvarigt elavbrott. Två tredjedelar har genomfört en riskanalys eller beredskapsplan där värmeförsörjningen ingår. Tre fjärdedelar kan med reservkraft upprätthålla hela eller delar av sin värmeproduktion. I 189 kommuner (84 procent av de tillfrågade) har fastigheter med prioriterade verksamheter, där värmeförsörjning är nödvändig vid ett längre elavbrott, identifierats. I övrigt innehåller rapporten en uppsamling av det som skrivits tidigare. Bland annat påpekas att radiatorsystem för några decennier sedan utformades för själv-cirkulation men att detta numera förhindras genom generellt klenare dimensioner och kraftig ventilstrykning. Det konstateras att för att kunna leverera fjärrvärme krävs elförsörjning till cirkulationspump och helst även till styr- och reglercentral.

Länsstyrelsen i Stockholms län har gett ut en promemoria som heter *Säkerheten i Stockholms läns Fjärrvärmennät* [36]. Den beskriver ett pågående arbete. Enkät svar från länets fjärrvärmeföretag ligger till grund för rapporten. En, för denna studie, viktig avgränsning i undersökningen är att den endast avser produktion och distribution av fjärrvärme. Den redovisar inte hur värme tas emot och hanteras av kunden. Däremot påpekas att det är ett grundläggande villkor för att kunna ta emot fjärrvärme att cirkulationspumpar och styr- och reglerutrustning har elförsörjning.

I spåren av stormen Gudrun har det kommit ut ett flertal rapporter från Energimyndigheten. I *Stormen Gudrun och uppvärmningen* [10] diskuteras erfarenheter från elavbrott med inriktning på uppvärmning av byggnader. Även denna rapport påpekar att det finns goda skäl att undersöka själv-cirkulation genom praktiska försök. Generellt hade man inga problem med fjärrvärmennätet i samband med Gudrun eftersom nästan alla större orter i de drabbade områdena inte hade några längre elavbrott. Dock lyfts fram att man har erfarenheter från ett elavbrott i Kista som visade att själv-cirkulationen i hus med moderna radiatorsystem med klena rördimensioner blev större än vad man trodde var möjligt. Hos Växjö Energi AB kunde man i samband med Gudrun notera tecken på viss själv-cirkulation i ett närvärmsystem [62]. Krisberedskapsmyndigheten har också gett ut en rapport efter Gudrun, *Krishantering i stormens spår* [27], som bland annat pekar på problemen med att fördela tillgänglig reservkraft och bristen på en ansvarig aktör för detta.

Det kanske mest kända fallet av ett långvarigt elavbrott vid kall väderlek är den isstorm som drabbade östra Kanada i januari 1998. Två rapporter behandlar denna händelse, dels Socialstyrelsens *Isstormen i östra Kanada januari 1998* [45], dels FOI:s (Totalförsvarets forskningsinstitut) *Isstormen i Kanada* [19]. Flera dagar av underkyllt regn orsakade kraftig nedisning och efter fem dagar var tre miljoner människor utan elektricitet. Ytterligare fem dagar senare hade de flesta fått strömmen tillbaka men en halv miljon människor var utan el i två veckor under extrem kyla. I regionen finns inga fjärrvärmesystem utan uppvärmningen sker i huvudsak med olja och el. Elavbrottet tvingade fram omfattande evakueringar. De flesta människor kunde flytta samman med vänner och släktingar men många fick ta sig till olika uppsamlingscentrum. Undersökningar har visat att människor upplevde att den största påfrestningen utgjordes av att försöka hålla värmen. Det elavbrott som drabbade nordöstra USA år 2003 inträffade i augusti månad och utgjorde därför inget hot för värmeförsörjningen. Artikeln *Experiences with Combined Heat and Power during the August 14, 2003 Northeast Blackout*, [3], redovisar dock intressanta erfarenheter med småskalig kraftvärme som i mycket stor utsträckning kunde fungera vidare under elavbrottet.

FOI:s rapport *Acceptabla elavbrott? Fyra strategier för säker elförsörjning* [20] handlar främst om elförsörjning och reservkraft medan fjärrvärme inte behandlas alls. Däremot har gränser satts upp för vad som är acceptabla störningstider för samhällsviktiga verksamheter. För exempelvis vård och omsorg har gränsen satts till sex timmar och för värme till hushåll till 24 timmar.

Energimyndighetens HEL-projekt genomfördes under åren 2001-2004 med syfte att skapa en grund för planering och genomförande av säkerhets- och beredskapsåtgärder i samband med störningar i elförsörjningen. Projektet har genererat en mängd rapporter. Här refereras till slutrapporten *Helhetssyn för Elförsörjningens säkerhet och beredskap (HEL-projektet)* [16]. Pilotprojekt genomfördes i kommunerna Karlskrona, Stenungsund, Eskilstuna och Huddinge. Arbetet syftade till att hitta former för lokal samverkan mellan myndigheter, elföretag och användare. Projektet avslutades 2004, men arbetet fortsätter inom ett antal områden, bland annat genom Utveckling av privat-offentlig samverkan på lokal/regional nivå (UPOS) där föreliggande arbete ingår.

Bland andra arbeten som berör fjärrvärme vid elavbrott märks exempelvis *Kunskapsläget inom småskalig kraftvärmeproduktion och eloberoende värmesystem* [11], utgiven av Energimyndigheten. Beträffande fjärrvärme konstateras att det stora problemet ligger hos mottagande fastigheter vars distributionssystem inte fungerar med självirkulation. Detta konstateras även i *Hur trygg är vår energiförsörjning?* [12] från Energimyndigheten som också understryker den påfrestning på samhället som ett långvarigt avbrott i värmeleveranser skulle innebära på grund av evakueringar och sönderfrysta vattenledningar. En annan rapport från Energimyndigheten är *Fjärrvärme vid ö-drift* [14], som kom ut 2007. Den behandlar problemen med att elproduktionen vid ö-drift normalt inte kan täcka behovet både hos prioriterade samhällsfunktioner och i bostäder. I rapporten behandlas möjligheter och svårigheter med att nyttja fjärrvärmesystemet vid ö-drift. Förslag ges för hur el- och fjärrvärmesystemet ska koordineras och organiseras. På flera platser i rapporten återkommer frågan om kundernas möjligheter att ta emot värme beroende på eventuell självirkulation. Dock ges olika budskap, dels hävdas att kunderna inte kan ta emot värme utan el, dels anges att en mycket begränsad mängd värme kan tas emot. Till vår förstudie refereras också,

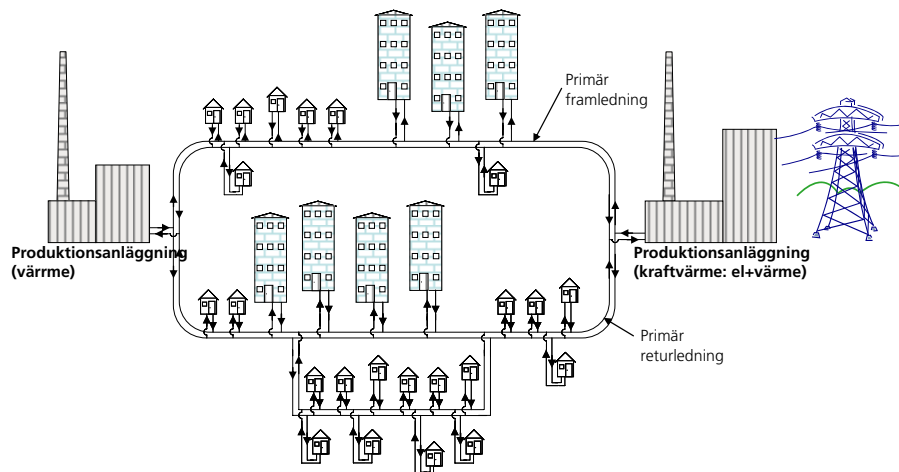
dessvärre har man dragit slutsatsen att självcirkulation till viss del fungerar i äldre hus men knappast i nyare (endast ett objekt byggt senare än 1960 redovisades dock i förstudien).

Avslutningsvis hänvisas till två skrivelser om samhällets beredskap för elavbrott. Krisberedskapsmyndighetens årliga bedömning av samhällets samlade förmåga att hantera allvarliga kriser, *Samhällets krisberedskap Förmåga 2007* [29]. Där står att läsa: ”KBM bedömer att samhällets operativa förmåga vid ett långvarigt regionalt elavbrott är bristfällig.” Vidare står att: ”Den kommunaltekniska försörjningen, som fjärrvärme och dricksvatten, är mycket känslig för elavbrott. Fjärrvärmens elberoende är välkänt och välanalyserat. Beroendet finns i alla led: produktion, distribution och konsumtion. I produktionsledet kan även ett kort elavbrott innebära en återstarttid på flera timmar. Reservkraft är sällsynt.”

Riksrevisionen har presenterat en granskning som heter *Statens insatser för att hantera omfattande elavbrott* [44]. Denna granskning, som uppmärksammades i SVT:s Rapport den 9 oktober 2007, konstaterar bland annat att ”Det finns brister i myndigheternas risk- och sårbarhetsanalyser på området” samt ”Värme- och livsmedelsförsörjningen kan bland annat på grund av kyla snabbt komma att bli kritiska faktorer [...]. Fastigheter [...] riskerar att få bestående skador som kan medföra stora ekonomiska konsekvenser, givet att snabba åtgärder inte kan sättas in”.

VAD HÄNDER MED VÄRMEN VID ETT ELAVBROTT?

I detta kapitel beskrivs vad som händer med ett fjärrvärmenät och de anslutna byggnaderna vid ett elavbrott. För den som inte är så orienterad inom energiförsörjning visar Figur 1 principen för hur ett fjärrvärmenät kan se ut.



Figur 1 Principskiss av ett fjärrvärmenät. Till nätet är både större och mindre kunder anslutna och värmen produceras i detta fall i två anläggningar varav den ena är ett kraftvärmeverk som även levererar el till elnätet.

I detta exempel produceras värmen dels i ett värmeverk och dels i ett kraftvärmeverk, där det sistnämnda även producerar el.

FJÄRRVÄRMENÄTET – PRODUKTIONSANLÄGGNINGAR OCH DISTRIBUTIONSNÄT

Detta arbete fokuserar främst på vad som händer i fjärrvärmeanslutna byggnader vid ett elavbrott. För att det överhuvudtaget ska vara meningsfullt måste fjärrvärmenätet fungera, om än i begränsad omfattning. Frågan är då om detta är realistiskt. Som nämnts i kapitlet Tidigare arbete, så genomfördes 1998 en enkätstudie bland 75 av landets fjärrvärmeproducenter angående frågor om krisberedskap, se [6]. Undersökningen gav både uppmuntrande och nedslående resultat: Bara två företag menar att de kan leverera och att kunderna kan ta emot värme och hälften menade att ett tre dygn långt elavbrott kan resultera i frysskador på byggnader. Däremot kan 80 procent av anläggningarna undvika frysskador i det egna distributionssystemet. Krisberedskapsmyndigheten påpekar att många prioriterade kommunala fastigheter förses med reservkraft vilket ökar möjligheten att ta emot värme, något som tidigare inte ansetts vara fallet, [28]. Dock sätts reservkraft i fjärrvärmeproduktionen oftast in vid oljeeldade spetslastanläggningar på grund av att värmeunderlaget förmodas vara begränsat, [ibid.].

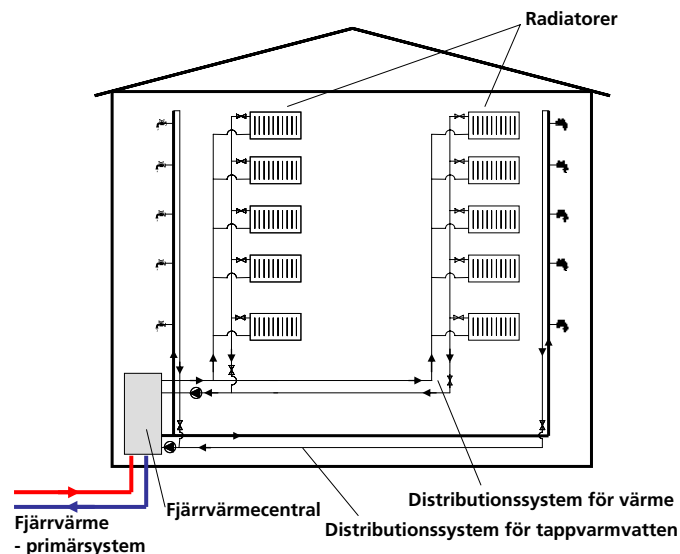
Man kan sluta sig till att förutsättningarna att upprätthålla produktion och distribution av fjärrvärme varierar kraftigt i landet. Som detta arbete dock kommer att visa finns det all anledning att försäkra sig om att driften av fjärrvärmenätet kan garanteras vid ett långvarigt elavbrott. I rapporten kommer framöver att förutsättas att driften av fjärrvärmenätet kan upprätthållas.

FJÄRRVÄRMECENTRALEN

Som redan framgått råder en utbredd uppfattning att alla typer av uppvärmningssystem är beroende av el för att fungera, även fjärrvärme. I detta arbete studeras dock i detalj vad som faktiskt händer i ett fjärrvärmeanslutet uppvärmningssystem. Helt klart är förstås att alla komponenter som använder el slutar att fungera. Frågan är hur detta påverkar värmeöverföringen från fjärrvärmenätet till byggnaden.

Fjärrvärmevattnet kommer in i en ansluten byggnad genom ett rör och lämnar den i ett annat. Det är dock inte detta vatten som går vidare ut till radiatorerna utan i fjärrvärmecentralen växlas värmen via värmeväxlare. Antalet värmeväxlare beror på antalet system som ska tillföras värme (sekundära system), till exempel tappvarmvatten, radiatorsystem och ventilation. På så sätt kommer aldrig fjärrvärmevattnet (primärsida) i kontakt med vattnet i de sekundära systemen.

Figur 2 nedan visar en översiktlig bild av en fjärrvärmeansluten byggnad.



Figur 2 Översiktlig bild av en fjärrvärmeansluten byggnad.

Värmetillförseln regleras genom att styra fjärrvärmeflödet genom respektive värmeväxlare. För varje utetemperatur finns en önskad temperatur på sekundärflödet som lämnar värmeväxlaren. För att uppnå detta mäts den utgående temperaturen och regulatorn skickar en signal till det ställdon som reglerar ventilen som anger om det ska öka eller minska öppningsgraden, det vill säga hur mycket fjärrvärmeflöde som ska släppas igenom. Vid ett elavbrott kommer varken regulator, reglersignal eller det elektriskt drivna ställdonet att fungera. Det förekommer även (främst i småhus) självverkande styrventiler som inte är

beroende av el. Olika typer av ställdon och hur dessa fungerar vid elbortfall diskuteras längre fram. Dock är det så att de flesta ventiler kommer att stanna i sitt befintliga läge. Vissa ventiler kan stänga och därmed förhindras att värme kan överföras från fjärrvärmenätet.

Cirkulationspumpar är en annan central komponent i fjärrvärmecentralen som drivs med el. Pumpar används för att cirkulera vattnet i de sekundära systemen. Den till synes allmänna uppfattningen att även fjärrvärmeuppvärmning slutar att fungera vid ett elavbrott kommer av att cirkulationen, driven av pumpar, upphör.

I fjärrvärmecentralen finns ytterligare en eldriven komponent i form av en energimätare. Den kan vara batteridrivna eller nätansluten. Om den är nätansluten kommer förstas debiteringen av värme inte att fungera men detta kanske, under omständigheterna, kan betraktas som mindre viktigt. Huruvida energimätaren fungerar eller inte har ingen betydelse för om fjärrvärmecentralen kan överföra värme.

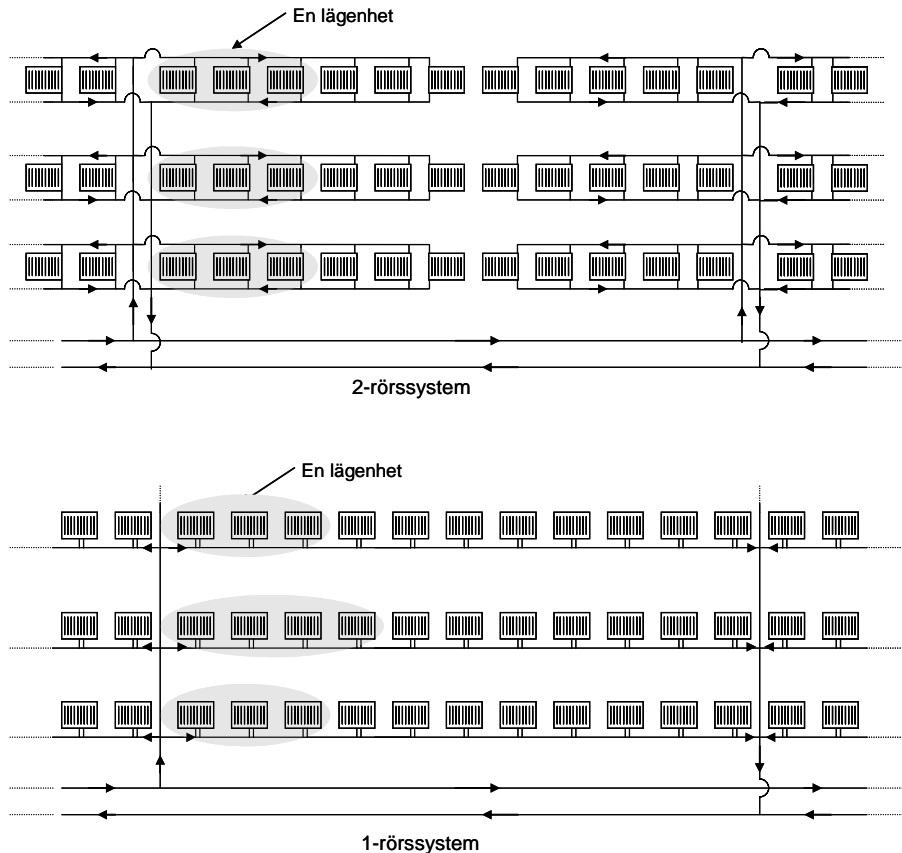
Det blir allt vanligare att reglering och övervakning av fjärrvärmecentraler sköts av så kallade dataundercentraler (DUC). DUC:ar integrerar automation av alla VVS-installationer i en byggnad. Normalt är dessa utrustade med batteribackup för att behålla minne och klocka vid ett elavbrott. DUC:en påverkar dock normalt inte styrventilerna vid ett elbortfall.

Om fjärrvärmenätet är i drift och en styrventil har stannat i sitt befintliga läge vid ett elavbrott kommer fjärrvärmevatten att fortsätta att flöda genom respektive värmeväxlare. Frågan är om värme kan överföras till det sekundära systemet trots att pumpen inte är i drift. Detta kommer att studeras i nästa kapitel.

RADIATORSYSTEMET

Radiatorsystemet är det vattenburna rörsystem som genom värmeavgivning i radiatorer värmer byggnaden. Cirkulationspumpen har redan berörts och det är denna som är den mest centrala (normalt den enda) eldrivna komponenten i radiatorsystemet.

Systemet är (likt fjärrvärmenätet) i de flesta fall uppbyggt med en framledning och en returledning (tvårörssystem). De förekommer också system där radiatorerna är anslutna i serie (ettörssystem). Dessa båda systemtyper visas i Figur 3.



Figur 3 Radiatorsystem av tvårörs- respektive ettrörstyp.

Den styrventil som reglerar fjärrvärmeflödet till radiatorvärmväxlaren är i princip aldrig utrustad med någon mekanism som automatiskt stänger vid elavbrott (så kallad fjäderåtergång). Dock förekommer vissa typer av ställdon som alltid stänger då de blir spänningslösa.

På radiatorerna sitter ventiler för att flödet i varje radiator ska kunna regleras. Ofta är dessa utrustade med en termostat som är en form av självverkande reglering. Ett expanderande medium öppnar eller stänger ventilen beroende på rumstemperaturen. Denna komponent är därför inte elberoende. Det kan ibland förekomma mer avancerad rumsreglering med elmotordrivna radiatorventiler.

I nästa kapitel kommer möjligheter till självcirkulation och olika typer av ställdon att studeras.

VENTILATIONSSYSTEMET

De flesta bostadshus har någon form av frånluftsventilation, antingen genom självdrag eller genom mekanisk frånluft, där luften avlägsnas från byggnadens olika delar genom ett kanalsystem. Vid frånluftsventilation ersätts den bortförda luften genom ny luft som tas direkt utifrån genom tilluftsdon i ytterväggarna och genom otätheter i huskonstruktionen. I dessa ventilationssystem tillförs den tillförda luften ingen värme.

Lokaler, det vill säga byggnader med olika typer av verksamheter, såsom offentliga byggnader, kontor, förskolor, skolor, vårdinrättningar, varuhus, industrier etc. har i regel även tilluftsventilation. I ett sådant system tas uteluft in centralt och hanteras i ett ventilationsaggregat innan det tillförs byggnadens olika delar via ett kanalsystem. I ventilationsaggregatet finns normalt filter för rening av luften, värmeväxlare där värme från frånluften återvinns genom att överförs till tilluften, och möjlighet att ytterligare värma luften. I många system finns dessutom möjlighet att kyla luften. I många byggnader, till exempel där det finns mycket elektronisk utrustning, kraftig solinstrålning eller där många personer vistas, kan det totala kylbehovet vara större än det totala uppvärmningsbehovet under året [1].

Luftbatterier tillförs värme genom ett vattenburet rörsystem från fjärrvärmecentralen. Det kan ske genom en egen värmekrets men ofta är distributionen integrerad med radiatorsystemet. I en liten ventilationskrets, för exempelvis en mindre butik eller förskola i ett bostadshus, är luftbatteriet ofta anslutet till radiatorsystemet, i likhet med radiatorerna. I stora lokalbyggnader är radiatorsystem och ventilationskretsar normalt anslutna till en gemensam värmekrets genom shuntkopplingar, som kan vara placerade på olika platser i byggnaden.

Ventilationen kommer också att studeras längre fram, men generellt kan sägas att den inte kommer att fungera vid ett elavbrott. Fläktar stannar i ventilationssystemen och för att förhindra förfrysning av luftbatterier är dessa normalt utrustade med självstängande luftspjäll (fjäderåtergång).

TAPPVARMVATTEN

Tappvarmvattensystemet skiljer sig åt en del mellan å ena sidan småhus och å andra sidan flerbostadshus och lokaler. I småhus används normalt självverkande reglering av tappvarmvattentemperaturen, vilket innebär att regleringen inte är elberoende.

Tappvarmvattensystem i flerbostadshus och lokaler har normalt tappvarmvattencirkulation (VVC) vilket är mindre vanligt i småhus. Detta innebär att varmvatten cirkuleras kontinuerligt genom att det finns en returledning i tappvarmvattensystemet. Det finns två huvudsakliga anledningar till att använda VVC: Tiden det tar att få varmt vatten vid tappstället minskar kraftigt. Det kan annars ta lång tid, i synnerhet då inga tappningar gjorts under lång tid, till exempel tidigt på morgonen. Den andra anledningen är att minimera risken för bakteriell tillväxt, främst av legionellabakterier. Utan VVC svalnar varmvattnet av i systemet och temperaturen blir gynnsam för bakterietillväxt. I VVC-system ska inte temperaturen understiga 50°C, [2], vilket innebär att tillväxt förhindras.

Reglering av tappvarmvattensystem har en fundamental skillnad jämfört med uppvärmningssystem, nämligen lastförändringarna. I ett uppvärmningssystem varierar lasten, alltså uppvärmningsbehovet, naturligtvis kraftigt mellan sommar och vinter, men förändringen är långsam. Även förändringarna över dygnet är långsamma och ställer inga större krav på snabbhet i regleringen. Tappvarmvattensystemet har dock mycket hastiga variationer i lasten. Extremfallet är ett småhus där tappvarmvattenlasten momentant kan gå från noll till max (vilket är i storleksordningen fyra gånger större än maximala effekten för uppvärmning) då en kraftig tappning inleds. I större system är sammanlagringen påtaglig, det vill säga det faktum att alla tappningar på olika platser i byggnaden inte sammanfaller

utan jämnas ut. Trots detta är även här lastförändringarna hastiga och kraftiga. Detta har betydelse för vad som händer vid ett elavbrott. Om spänningen försvinner vid ett tillfälle när tappvarmvattenlasten är mycket hög, till exempel på morgonen, så har styrventilen till tappvarmvattensystemet en hög öppningsgrad. Är ventilen då av en typ som stannar i sitt läge kommer fjärrvärmeledet genom tappvarmvattenväxlaren att fortsätta att vara högt. När tappningarna har avtagit och lasten alltså är låg igen kommer tappvarmvattentemperaturen att bli mycket hög. Den kommer att närma sig fjärrvärmenätets temperatur som, beroende på utetemperatur, uppgår till 80-110°C.

På grund av risken för brännskador genom skällning utrustas styrventiler för tappvarmvatten ofta med fjäderåtergång. Detta rekommenderas också av branschorganisationen Svensk Fjärrvärme [53]. Konsekvensen av detta är att man i många byggnader inte kan räkna med att få något tappvarmvatten under ett elavbrott. Undantaget är småhus, där tappvarmvattensystemet kan antas fungera normalt så länge det finns tryck i kallvattennätet, och större tappvarmvattensystem som inte har självstängande styrventiler. Det faktum att styrventilen i det sistnämnda fallet kan stanna i vilket läge som helst och att cirkulationspumpen för varmvattencirkulationen stannar gör att tappvarmvattentemperaturen kan bli mycket hög.

UTKYLNING AV BYGGNADER

I detta avsnitt utgår vi ifrån att uppvärmningen upphör att fungera för att resonera kring vilka konsekvenser detta kan få och varför det är angeläget att säkra värmeförsörjningen.

Om uppvärmningen upphör att fungera så blir det förstås inte omgående kallt i en byggnad. Hur lång tid det tar beror bland annat på byggnadens värmetröghet och hur stor luftomsättningen blir utan el. Gränsen för vilken temperatur som kan anses som acceptabel beror i sin tur på vilket ändamål byggnaden används till. Två referenser som mycket grundligt behandlar både byggnadens utkylning och acceptabla temperaturnivåer är Energimyndighetens *Referenspärm med informationsmaterial* [18] och *Säkrare värmeförsörjning!* [4].

Generellt anses +5°C utgöra gräns för den lägsta temperatur som kan accepteras av hälsoskäl i samtliga typer av byggnader. Denna nivå ger en marginal som gör att alla vatteninstallationer bör klara sig mot frysskador, även om de är placerade i utsatta delar av byggnadskonstruktionen, nära omgivande uteluft. För människor gäller att de flesta friska individer, med rejäla kläder och med fysisk aktivitet, kan klara en inomhustemperatur på 5 grader under en begränsad tid. För äldre och sjuka kan dock knappast temperaturer under 18-20 grader accepteras. Socialstyrelsen anger i *Temperatur inomhus* [48] att gränsen för olägenhet för människors hälsa går vid 18 grader. För känsliga grupper är gränsen satt till 20 grader.

Hur lång tid tar det innan nämnda gränser passeras? Som nämndes i Tidigare arbete har gränsen för acceptabla avbrott i uppvärmningen inom vård och omsorg satts till sex timmar och för hushåll till 24 timmar [20].

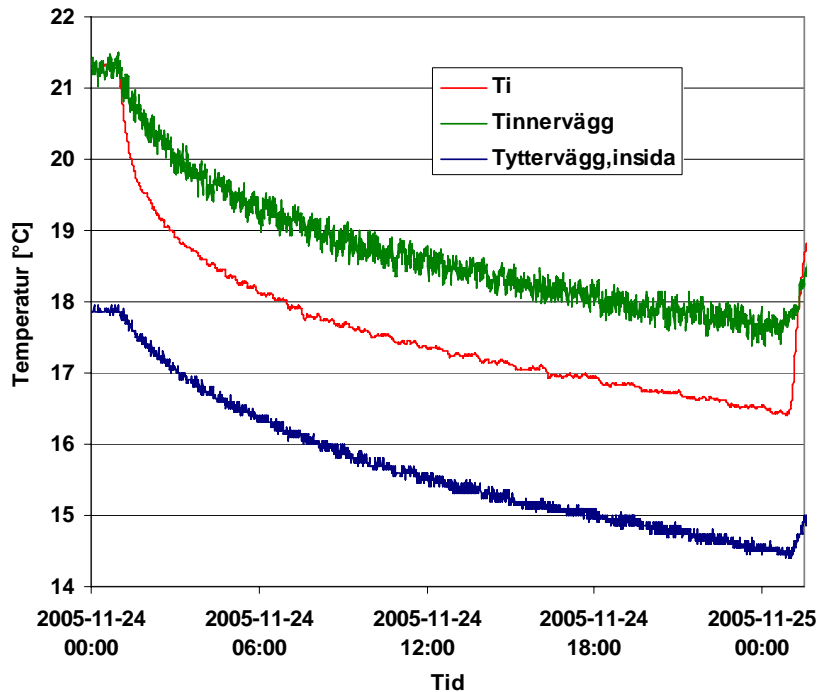
Olika typer av byggnader, från olika tidsepoker, byggda med olika tekniker och material, har vitt skilda egenskaper både beträffande värmetröghet och beträffande ventilation. Generellt har många gamla hus en tyngre stomme och därmed högre värmetröghet. Å andra sidan har

nyare hus bättre isolering vilket också bidrar till en hög tröghet. I gamla hus som har självdragsventilation kan ventilationen vid ett elavbrott vara mycket hög om utetemperaturen är låg, vilket kraftigt skyndar på utkylningen. Boende i småhus är generellt mer utsatta då dessa hus är lättare och kyls ut snabbare. Å andra sidan kan fastighetsägaren lättare vidta egna förberedande åtgärder, till exempel skaffa ett reservaggregat. Boende i flerbostadshus är mer utsatta på så sätt att människor har svårare att skaffa egna beredskapslösningar och att dessa hus kräver större insatser vid en evakuering.

Byggnadens tidskonstant är ett mått på byggnadens värmetröghet. I *Svensk Standard Dimensionerande utetemperatur – Byggnaders effektbehov* [54] definieras tidskonstanten som förhållandet mellan byggnadens värmekapacitet och värmeförluster. Denna referens och *Säkrare Värmeförsörjning!* [4] innehåller mycket utförlig information kring tidskonstanter för byggnader från olika tidsperioder. Energimyndighetens referenspärm [18] innehåller sammanfattande tabeller över hur lång tid det tar att nå 5 grader vid olika utetemperaturer i olika typbyggnader.

Säkrare Värmeförsörjning! [4] påpekar en viktig faktor att ha i åtanke, nämligen att de värmelagrande delarna av en byggnad inte avger någon värme förrän inneluftens temperatur är lägre. Normalt är insidan av en yttervägg någon eller några grader kallare än inneluften. Effekten av detta illustreras tydligt i följande experiment:

Ett mindre arbetsrum i M-huset på LTH som stod tomt utrustades med en mängd temperaturgivare, i luften, på väggarna, i ytterväggen och på utsidan av densamma. Radiatorn stängdes av och ventilationen täpptes till så gott det gick och en elradiator, som kunde styras med timer, placerades i rummet. Figur 4 nedan visar förloppet från ett försök då värmetillförseln avbryts. Den översta (gröna) linjen visar temperaturförloppet på rummets innerväggar. Den understa (blå) linjen visar temperaturförloppet på ytterväggens insida. Denna ligger drygt tre grader under innerväggarnas temperatur och inomhusluftens initiala temperatur. I mitten (röd linje) visas inomhusluftens temperaturförlopp.



Figur 4 Test av innetemperaturens tidskonstant. Linjerna visar temperaturförloppen för innerväggarna (grön), luften (röd) och ytterväggens insida (blå) vid avbrott i värmeförseln. Utetemperaturen var under testet cirka 5°C.

Båda väggtemperaturerna följer samma exponentiellt avtagande temperaturförlopp, precis som man kan förvänta. Inomhusluftens temperatur sjunker dock inledningsvis ganska kraftigt. Enligt en enkel betraktelse utifrån byggnadens tidskonstant, som exempelvis görs i nyss nämnda standard för dimensionering [54] så skulle inomhustemperaturen ha sjunkit tre grader efter ungefär 18 timmar. Vi ser dock att det endast är innerväggarna som följer detta förlopp, luften kyls snabbare. Efter ungefär sex timmar har inomhustemperaturen sjunkit tre grader, alltså tre gånger snabbare än för väggmaterialen.

Avslutningsvis kan sägas att många byggnader klarar åtskilliga dygn innan temperaturen blir kritisk, andra är betydligt känsligare. I många byggnader, i synnerhet de som bebos av äldre eller individer med svag hälsa, kan situationen vara mycket kritisk efter 24 timmar. För ett lätt hus vid mycket kall väderlek kan temperaturfallet bli 1°C per timme. I samband med elavbrottet i Quebec 1998 visade undersökningar [45] att 25-56 procent av befolkningen (beroende på region) tvingades lämna sin bostad.

BACKUPSYSTEM

För att skydda sig mot konsekvenserna av ett elavbrott finns möjligheten att ha ett backupsystem. Särskilt känsliga verksamheter, till exempel sjukhus och kommunal förvaltning, utrustas normalt med reservaggregat. Även andra verksamheter eller bostadshus kan utrustas med ett sådant backupsystem. I detta arbete har emellertid inte reservaggregat studerats, utan fokus är riktat mot alternativa lösningar.

En annan möjlighet att trygga fjärrvärmeförsörjningen är att använda batteribackup. Först och främst ska sägas att denna lösning, i likhet med självcirkulation som kommer att studeras ingående, kräver att fjärrvärmenätet kan drivas vidare under ett elavbrott.

Möjligheten med batteribackup har tagits upp i andra arbeten och generellt anses den inte vara ett realistiskt alternativ vid längre elavbrott. I *Sårbarhet hos fjärrvärmeförsörjning med tonvikt på känslighet för elavbrott*, [9], förs ett längre resonemang med slutsatsen att batterivolymen blir orimligt stor om man ska klara ett elavbrott längre än ett dygn. Samma författare skriver i *Säkrare Värmeförsörjning! Tillstånd, Förbättringsmöjligheter, Beredskapsåtgärder*, [4], att ”för cirkulationspumpar i flerfamiljshus och liknande stora byggnader räcker inte batteridrift om ett elavbrott överstiger några få timmar”. Samma slutsats förs fram i *Kunskapsläget inom småskalig kraftvärmeproduktion och eloberoende värmesystem – Insatser för ökad försörjningstrygghet*, [11], och i *Åtgärder för gamla och sjuka vid omfattande el- eller värmeavbrott*, [15]. Problemet uppges vara att nödvändiga batterivolymen blir orimligt stor i lite större byggnader och att lösningen kräver tillsyn och underhåll och därmed kan bli dyr. Ett enkelt överslag visar svårigheten att använda batterier under längre tid: Ett effektuttag på 100 W ur exempelvis ett bilbatteri som ger 12 V innebär en ström på ca 8,3 A, om batteriet är på 60-70 Ah innebär det en drifttid på 7,5-9 timmar (60-70 Ah/8,3 A). Detta kan vara en rimlig lösning i ett småhus där den pumpen kräver runt 50 W. I ett flerbostadshus kommer man dock snabbt upp i 200-300 W pumpeffekt och batterivolymen blir stor om man vill kunna klara några dygn.

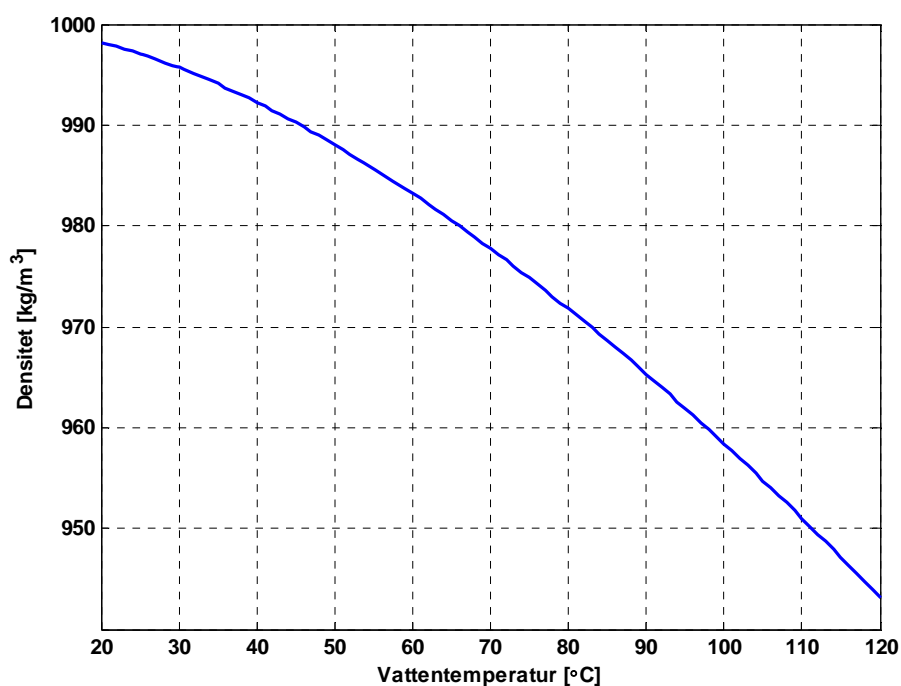
Som beskrivs i *Sårbarhet hos fjärrvärmeförsörjning med tonvikt på känslighet för elavbrott*, [9], kan man dock tänka sig ett arrangemang där batterier används för att köra endast cirkulationspumpen, och dessutom vid ett lägre varvtal än normalt, för att på så sätt bromsa ett utkylningsförlopp.

SJÄLVCIRKULATION

Följande kapitel beskriver nyfunna resultat kring självcirkulation i radiatorsystem, framför allt i system byggda för pumpdrift.

MEKANISM

Självcirkulation uppstår genom det faktum att varmt vatten upptar en större volym än kallt vatten, eller med andra ord, att vattnets densitet minskar då temperaturen stiger. För att kunna utnyttja detta fenomen till att cirkulera vatten i ett slutet system måste det varma vattnet ges en möjlighet att stiga uppåt medan det kalla vattnet måste kunna sjunka nedåt. Figur 5 nedan visar hur vattnets densitet förändras vid olika temperaturer.



Figur 5 Vattnets densitet vid olika temperaturer.

Mekanismen för självcirkulation utnyttjades när centralvärmesystem introducerades för byggnadsuppvärmning under 1800-talet. Pumpar blev inte vanliga förrän en bit in på 1900-talet. Självcirkulationen drivs av det differenstryck som uppstår av vattnets densitetsskillnad mellan framledning och returledning. Varmt vatten lämnar värmekällan (som kan vara en panna, fjärrvärmecentral eller värmepump), stiger i systemet och kyls av då det avger sitt värme i radiatorerna. Det kallare vattnet sjunker i systemet och återvänder till värmekällan.

Följande ekvation beskriver differenstrycket som funktion av vattnets densitetsskillnad. Tryckskillnaden beror även på höjdskillnaden, h , i systemet och tyngdaccelerationen, g .

$$\Delta p_{själv} = (\rho_r - \rho_f) \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \quad (1)$$

Differenstrycket från densitetsskillnaden är mycket litet. Man kan jämföra med ett pumpdrivet system, beroende på systemets storlek ger pumpen ett differenstryck på 30-100 kPa eller 3-10 mvp (meter vattenpelare). Från Figur 5 ovan ser man att densitetsskillnaden blir ungefär 10 kg/m^3 vid ett normalt temperaturintervall i ett radiatorsystem (t ex $65\text{-}45^\circ\text{C}$). Om vi antar att systemet är 10-20 meter högt och att tyngdaccelerationen är $9,81 \text{ m/s}^2$ så blir differenstrycket 1-2 kPa eller 0,1-0,2 mvp. I det här exemplet är alltså differenstrycket beroende på vattnets densitetsskillnad endast 2-3 procent av det differenstryck som en pump ger.

För att självcirkulationssystemen skulle fungera optimalt byggdes de med stora rördiametrar för att ge lågt strömningsmotstånd och därmed hålla tryckfallen i systemet så låga som möjligt. Även pannan utformades för ett långt strömningsmotstånd.

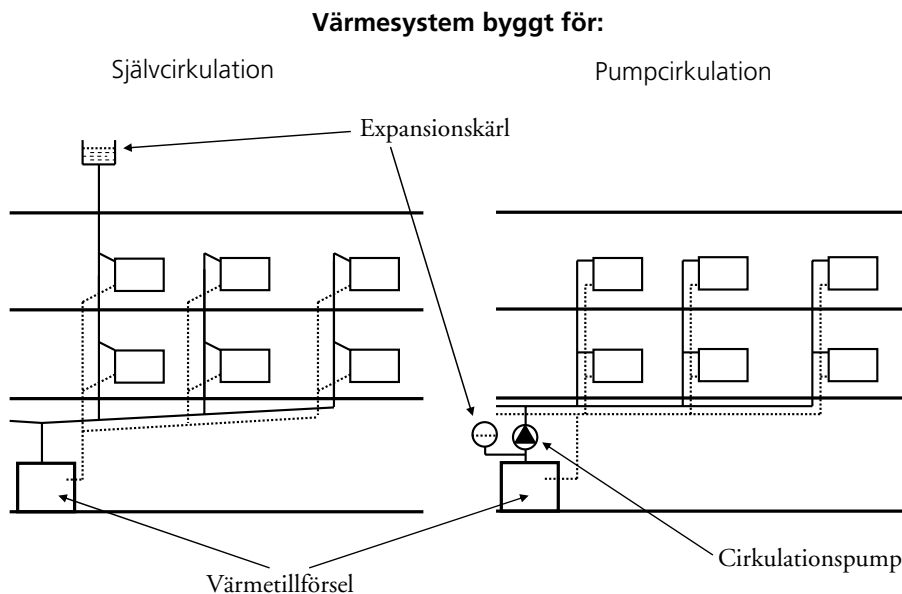
HISTORIK

Det finns en hel del äldre litteratur om uppvärmningssystem. Här hänvisas till de svenska referenserna [24] och [38] samt till den engelska referensen [37].

Med centralvärme menar vi i allmänhet byggnadsuppvärmning där värme distribueras från en central värmekälla till byggnadens rum istället för att dessa värms upp individuellt. Bland de äldsta uppvärmningssystem som kan liknas vid centralvärme finns de så kallade hypokaustsystemen som hittats vid utgrävningar av romarnas samhällen. De bestod av luftmellanrum under golven i vilka de heta rökgaserna leddes. Mer eller mindre liknande luftvärmesystem användes till dess att ång- och vattenvärmesystemen blev vanliga på 1800-talet. Att använda ånga som distributionsmedium var till en början vanligare att använda än vatten då det var enklare att cirkulera och att leda långa sträckor samt klarade sig med mindre rördimensioner. Varmvattensystemen tog emellertid över efterhand, bland annat för att de var enklare att reglera samt generellt var mer robusta. Den främsta anledningen var dock att man i början av 1900-talet, då elektricitet började bli mera allmänt tillgänglig, började introducera pumpar i vattensystemen.

VAD KARAKTERISERAR ETT PUMPFÖRSETT SYSTEM?

Införandet av pumpdriven cirkulation i radiatorsystemen innebar att systemens utformning sakta men säkert förändrades. Det avsevärt mycket högre drivtrycket gör att man inte behöver bekymra sig för strömningsmotstånd i samma utsträckning.



Figur 6 Principiell skillnad mellan ett radiatorsystem byggt för själv- respektive pumpcirkulation. Själv-cirkulationssystemen konstruerades ofta med en svag lutning av de horisontella rören för att underlätta uppstart av själv-cirkulation. I gamla system använde man även öppna expansionskärl.

Medan man i själv-cirkulationssystemen dimensionerade rörledningarna så att drivtrycket skulle räcka till att förse den sämst placerade radiatoren med tillräckligt vattenflöde, så dimensioneras ett pumpdrivet system i regel efter ett maximalt tillåtet tryckfall eller en maximal tillåten strömningshastighet. I Sverige idag används normalt gränsen 100 Pa per meter rörledning. På så sätt undviker man att få så höga strömningshastigheter att man löper risk för oljud. Rördiametrarna i pumpförsedda system är alltså överlag mindre än i själv-cirkulerande. Generellt är de grövre i tidiga pumpsystem, exempelvis system från 1950-talet medan de på 1970-talet hade blivit markant klenare, på grund av en ambition att minska materialåtgången.

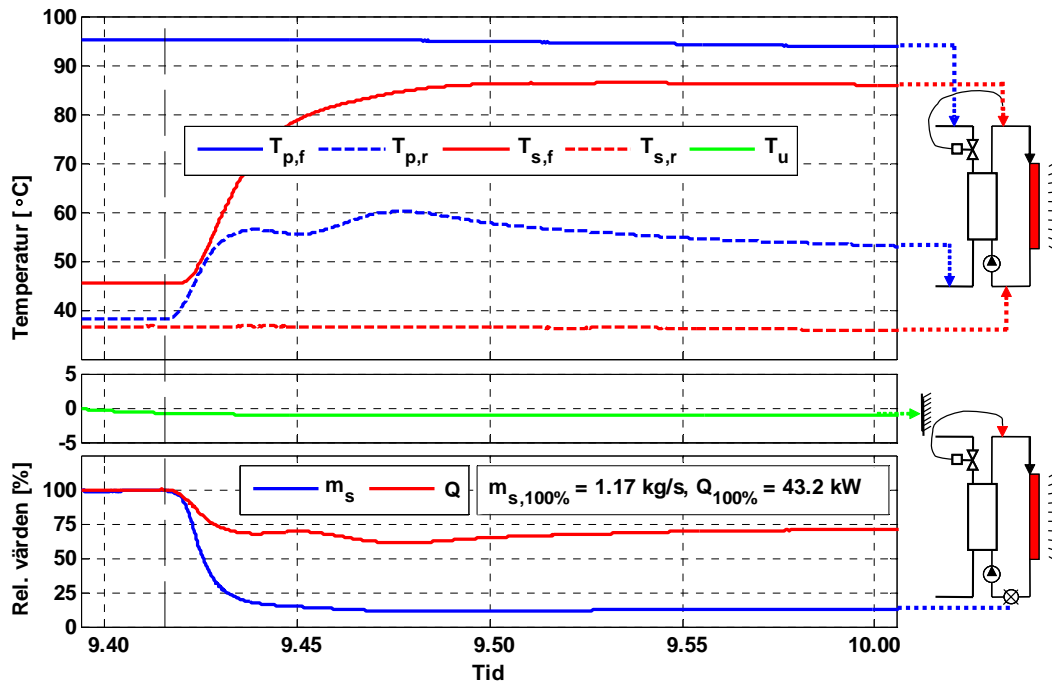
Med samma motiv började även så kallade ettrörssystem byggas. I dessa seriekopplades radiatorerna i en eller ett par lägenheter. På så sätt blev tryckfallet avsevärt mycket högre än i ett tvårörssystem, där radiatorerna är parallellkopplade (se Figur 3).

Det finns även andra faktorer som kan öka strömningsmotståndet i ett pumpförsedd system. Plattvärmeväxlare, radiatorernas termostatventiler och injusteringsventiler, som jämnar ut flödesfördelningen i systemet, är exempel på detta. Systemen är dessutom mer komplexa idag, i synnerhet i lokalbyggnader, där det ofta finns shuntkopplade undersystem. Sammantaget gör detta att det är svårt att på förhand uppskatta om själv-cirkulation kan fungera i pumpsystemen. Detta kommer att undersökas i följande avsnitt.

SJÄLVCIRKULATION I PUMPFÖRSEDDA SYSTEM

Försök med själv-cirkulation har genomförts i totalt 14 byggnader. Även om resultaten skiljer sig åt en hel del, så finns vissa principiella likheter mellan försöken. Figur 7 visar inledningen av ett försök utfört i ett flerbostadshus från 1952 med 20 lägenheter. På x-axeln visas klockan under försöket. Vid tidpunkten 9.42 (indikeras med en vertikal streckad linje) simuleras ett

elavbrott genom att regleringen och cirkulationspumpen stängs av. Innan dess fungerar radiatorsystemet normalt. Det övre diagrammet visar temperaturerna in och ut ur värmeväxlaren. $T_{p,f}$ (blå heldragen) och $T_{p,r}$ (blå streckad) är primärsidans (fjärrvärmesidans) fram- respektive returtemperatur medan $T_{s,f}$ (röd heldragen) och $T_{s,r}$ (röd streckad) är sekundärsidans (radiatorsystemets) fram- respektive returtemperatur. I det mittersta diagrammet visas utetemperaturen under försöket. Det nedersta diagrammet visar relativt flöde på sekundärsidan, m_s , (blå) och relativ överförd effekt till sekundärsidan, Q , (röd). Dessa båda är 100 procent innan försöket inleds. Till höger om figuren finns en skiss över radiatorvärmeväxlaren och -kretsen, dit respektive temperatur och flöde kan hänföras.

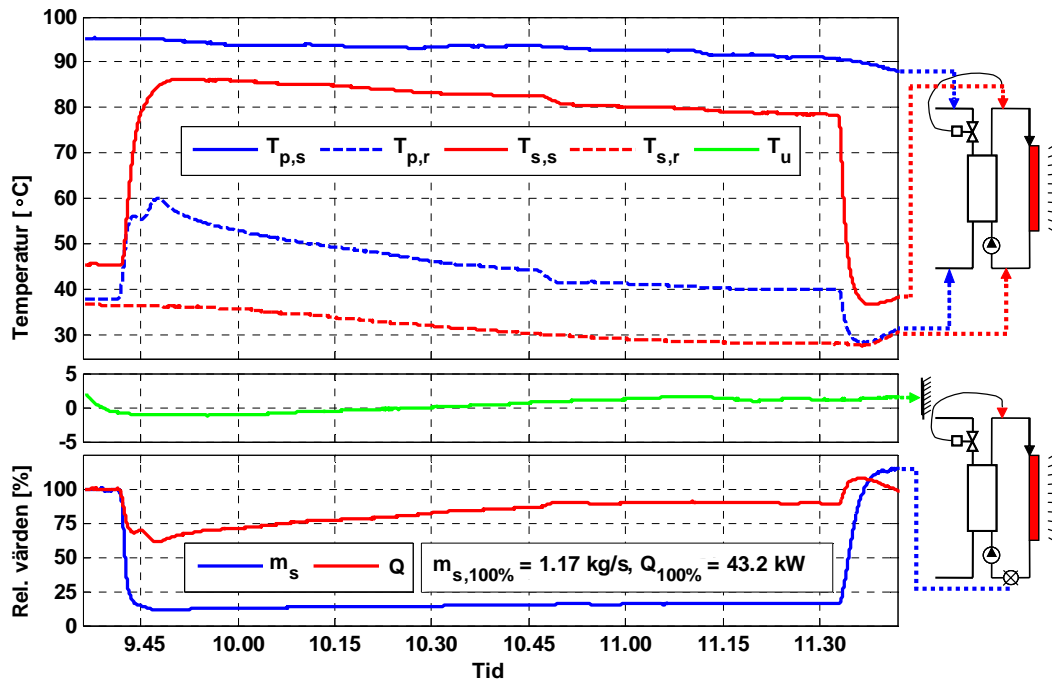


Figur 7 Inledningen av ett försök med självcirkulation. "Elavbrottet" infaller vid den streckade horisontella linjen. Det översta diagrammet visar fram- och returtemperatur på primär- respektive sekundärsida. Diagrammet i mitten visar utetemperaturen och det nedre visar det relativt radiatorflöde och avgiven radiatoreffekt.

Så fort "elavbrottet" inträffar sjunker sekundärflödet drastiskt och efter två minuter är det endast 15 procent av sin ursprungliga storlek. Som följd av detta blir flödets uppehållstid i värmeväxlaren mycket längre och vattnet värms till en avsevärt högre temperatur. Efter knappt tio minuter har temperaturen på sekundärflödet ut ur värmeväxlaren stigit med 40 grader och närmast sig den primära framledningstemperaturen. Den sekundära returtemperaturen är oförändrad vilket beror på transporttiden i radiatorsystemet. Den primära returtemperaturen stiger en del till att börja med. Detta beror på att mindre värme överförs i värmeväxlaren och primärsidans temperaturfall blir mindre. Primärflödet är självfallet oförändrat.

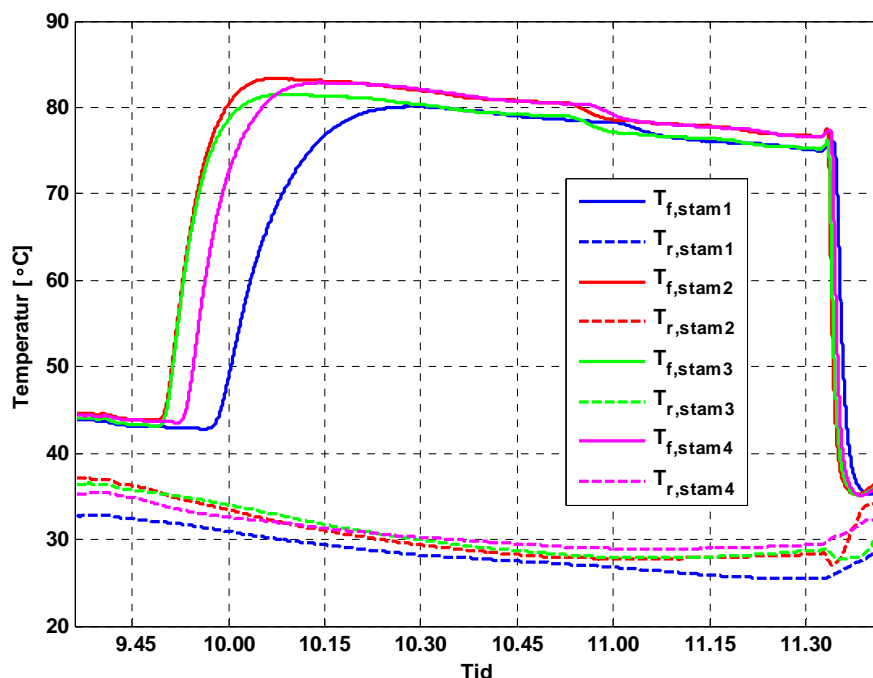
I Figur 8 visas hela försöket, som pågick i ungefär två timmar. Vi kan dra följande slutsatser:

Sekundärflödet ökar något men förblir relativt lågt, ungefär 15 procent. Den sekundära framledningstemperaturen är fortsatt hög, runt 80°C, även om den mattas av något vilket dels beror på det ökade sekundärflödet, dels på en sjunkande primär framledningstemperatur (på grund av att utetemperaturen stiger). Det beror även på att den sekundära returtemperaturen sjunker på grund av det mycket låga flödet, som i sin tur innebär en hög avkylning i radiatorerna. Sammantaget har vi ett lågt sekundärflöde (drygt fem gånger lägre) men en hög sekundär avkylning (ungefär fem gånger högre – 50° istället för 10°) vilket ger att den överförda effekten till radiatorsystemet är nästan lika hög som innan försöket inleddes (ungefär 90 procent av den ursprungliga nivån på 43 kW).



Figur 8 Ett försök med själv-cirkulation. Det översta diagrammet visar fram- och returtemperatur på primär- respektive sekundärsida. Diagrammet i mitten visar utetemperaturen och det nedre visar det relativt radiatorflöde och avgiven radiator-effekt.

Detta objekt är byggt för pump-cirkulation och har sedan det byggdes först bytt uppvärmningskälla från panna till fjärrvärme, därefter utrustats med ytterligare komponenter såsom injusteringsventiler och sedermera plattvärmeväxlare. Å andra sidan är det byggt med tidstypiskt generösa rördimensioner och byggnaden är relativt kompakt, det vill säga inga långa horisontella transportsträckor. För att försöka säkerställa om värmen fördelar sig någorlunda jämnt i byggnaden mättes temperaturerna i källarplanet på fyra jämnt fördelade stamledningar. Resultatet visas i Figur 9.



Figur 9 Mätning på stammar vid ett försök med självcirkulation.

Eftersom inte flödet är uppmätt i stammarna kan man inte definitivt uttala sig om hur värmen fördelar sig i systemet, men de höga och jämna temperaturnivåerna anger i alla fall att värmen når ut i hela systemet och relativt jämnt fördelat. Under försöket gavs tillstånd att kontrollera radiatorerna i en lägenhet, som var placerad i motsatt ände av huset relativt fjärrvärmecentralen, och det kunde konstateras att dessa var heta.

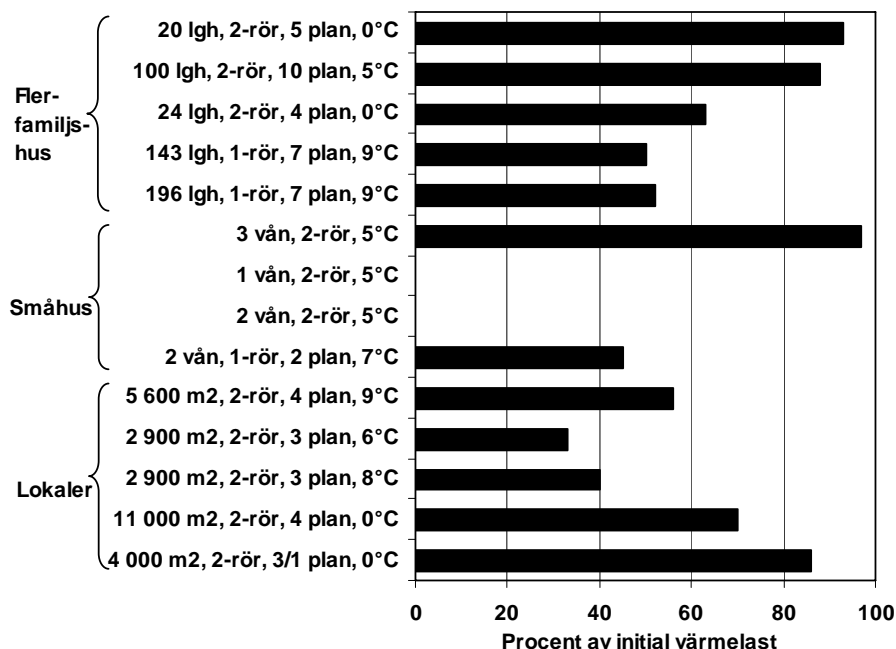
Försöket upprepades vid liknande väderlek men med något förändrade förutsättningar. Tanken var att se vad som händer, om man antar att cirkulationspumparna i fjärrvärmenätet omedelbart efter ett elavbrott, stannar av. Därför stängdes styrventilen till radiatorkretsen helt samtidigt som cirkulationspumpen i radiatorsystemet stängdes av. Efter två timmar konstaterades att såväl fram- som returledning på primär- respektive sekundärsida hade svalnat av till omgivningstemperatur. Därefter öppnades styrventilen till samma position som den hade innan den stängdes.

Samma händelseförlopp som vid det tidigare försöket upprepades nu, om än något långsammare. Den sekundära framledningstemperaturen steg efter en liten stund och självcirkulationen nådde så småningom upp till samma nivå som vid det förra försöket. Försöket visar alltså att möjligheterna till självcirkulation inte försämras av ett eventuellt avbrott i fjärrvärmeleveransen innan backupsystem satts in.

Resultatet av dessa försök får betraktas både som överraskande (med tanke på den allmänt negativa uppfattningen om potentialen för självcirkulation) och positivt (med tanke på beredskapsaspekten i händelse av ett längre elavbrott). I några av försöksobjekten har ett liknande resultat uppnåtts, det vill säga att värmeförseln faktiskt blir nästan lika hög vid självcirkulation som vid pumpdrift. I merparten av de totalt 14 undersökta byggnaderna blir dock värmeförseln lägre, ofta mellan 40-60 procent, men även dessa resultat kan betraktas

som positiva. Anledningen till att vissa byggnader fungerar sämre är att systemen har olika egenskaper som begränsar självcirkulationen. En del av dessa har redan nämnts, men fler hinder kommer att gå igenom i nästa avsnitt.

De svarta staplarna i Figur 10 visar den värmeförlust som uppnåddes i de undersökta byggnaderna. Varje objekt beskrivs kort genom vilken kategori de tillhör, dess storlek, höjd och den aktuella utetemperaturen vid försöket.



Figur 10 Sammanställning av genomförda försök med självcirkulation.

Som synes var utetemperaturerna vid försöken relativt höga, de spänner mellan 0-9°C. Naturligtvis hade det varit önskvärt att studera objekten vid betydligt lägre temperaturer men de tillfällen då temperaturen varit under 0°C i Malmöområdet under de två vintrarna 2006-2008 har varit få. Det är dock inte nödvändigt att genomföra försöken vid en särskilt låg temperatur för att kunna bedöma förutsättningarna för självcirkulation i en byggnad. För att uppskatta värmeförlusten vid låg utetemperatur kan man istället använda sig av beräkningar baserade på de utförda mätningarna. Sådana parametervariationer kommer att redovisas längre fram.

Det finns två försök där ingen självcirkulation alls kunde noteras vilket kräver en förklaring. Det ena försöket utfördes i en enplansvilla (utan källare) och eftersom självcirkulationen kräver att det finns en höjdskillnad mellan värmekälla (fjärrvärmecentralen) och värmeavgivare (radiatorer) är det logiskt att det inte uppstår någon cirkulation. Det försök som redovisas längst ned i Figur 10 utfördes i en skola som till största delen består av ett plan. Självcirkulationen blev ändå mycket god vilket var möjligt då fjärrvärmecentralen är placerad i en källare (som ligger under en fjärdedel av byggnaden). På taket ovanför fjärrvärmecentralen finns ett extra plan som inhyser bland annat ett fläktrum och gymnastiksalens högre takhöjd. På så sätt finns en drivhöjd på tre plan för självcirkulationen även om byggnaden i huvudsak har ett plan.

Det andra nollresultatet erhöles i ett småhus som hade en äldre typ av fjärrvärmecentral med förrådsberedare både för tappvarmvatten och för radiatorvatten. Värmeberedningen regleras med en självverkande termostatisk ventil. Förrådstanke höll en temperatur mellan 55 och 65°C och radiatorframledningens temperatur regleras med en trevägs shuntventil. Då shuntventilen kortslöt radiatorflödet uteblev själv-cirkulationen. Denna typ av fjärrvärmecentral begränsar den sekundära framledningstemperaturen till 55-65°C, även om inte shuntventilen hade kortslutit radiatorsystemet.

De resultat som visas i Figur 10 beskrivs inte vart och ett i detalj i denna rapport utan i stället diskuteras generella slutsatser som kunnat dras. För fler detaljerade diagram (som exempelvis Figur 8) hänvisas till projektets delrapport [33].

Det finns ytterligare ett fall av uppmätt själv-cirkulation som förtjänar att tas upp i detta sammanhang. I en studie som utfördes 2004 av fjärrvärmegruppen vid LTH studerades effekten av att införa ett VVC-system [26]. I byggnaden där forskargruppen sitter, M-huset på LTH, byggdes VVC-kretsen ut från att endast innefatta källarslingan till att även innefatta befintliga, men avstängda, stammar för att därefter visa på skillnader i temperaturer och användarmönster före och efter modifieringen. Det visade sig att VVC-systemets cirkulationspump stängdes av nattetid, sannolikt i syfte att spara energi. Samtidigt visade mätningarna i fjärrvärmecentralen att styrventilen till varmvattenkretsen läckte. Under den period då pumpen var avstängd var den utgående VVC-temperaturen från tappvarmvattenvärmeväxlaren ungefär 80°C (mot normalt 60°C). En installerad flödesmätare i kretsen noterade ett litet flöde och returtemperaturen låg kring 40°C. Sammantaget innebär detta att den inmatade energin till VVC-kretsen nattetid var lika stor som då pumpen var i drift. Med andra ord var detta inget särskilt lyckat försök att spara pengar.

Erfarenheter från Lagan under stormen Gudrun

Under stormen Gudrun drabbades generellt fjärrvärmeuppvärmd bebyggelse inte annat än kortvarigt och inga större problem med uppvärmningen uppstod [10]. I samband med detta projekt kom det dock till vår kännedom att E.ON:s fjärrvärmenät i Lagan upplevde vad som måste beskrivas som själv-cirkulation i anslutna fastigheter. Därför gjordes ett besök i Lagan [63].

Orten Lagan ligger strax utanför Ljungby och har ca 2 000 invånare. Där finns en biobränsle- och en oljepanna som levererar ungefär 10 GWh fjärrvärme och nätet omfattar de flesta delarna av samhället. Bland kunderna finns flerbostadshus, småhus, skolor, vårdinrättningar och industrier.

När stormen Gudrun drog in lördagen den 8 januari 2005 så försvann elen i Lagan vid 17-tiden. Två kunder (äldreboenden) var försedda med reservaggregat för att kunna driva cirkulationspumparna i värmesystemet. I samband med elavbrottet slogs dock driften av fjärrvärmenätet ut och de båda äldreboendena kunde därför inte ta emot någon värme. Då detta kom till värmeverkets kännedom (genom personalens besvikelse över att inte få någon värme trots att man hade reservkraft) beställdes ett reservaggregat in till värmeverket. Det anlände från Malmö på söndagskvällen och under natten mellan söndagen och måndagen kunde oljepannan och fjärrvärmenätets cirkulationspumpar åter tas i drift.

Under måndagen noterades en levererad effekt mellan 1,2-1,5 MW. I värmeverket noterades att det fanns en avkylning i nätet, även om den var lägre än normalt. På måndagseftermiddagen återkom så elen och effektuttaget steg inte mer än ungefär 20 procent. Under den tid då nätet var i drift samtidigt som det fortfarande var elavbrott, från söndag natt till måndag eftermiddag (åtminstone 10-12 timmar) noterades alltså en utmatad effekt motsvarande 80 procent av vad den annars borde ha varit.

Den rådande uppfattningen är att i princip alla styrventiler har stannat i sina lägen, även styrventiler för tappvarmvatten.

Kent Johansson, anläggningsansvarig för E.ON i Lammhult berättar om liknande erfarenheter [65]. Där drog man igång driften med hjälp av nöddiesel efter två dygn. Dock hade då redan 75 procent av orten fått spänningen tillbaka. I efterhand fick man höra från kunder som var strömlösa att de fått värme i sina system.

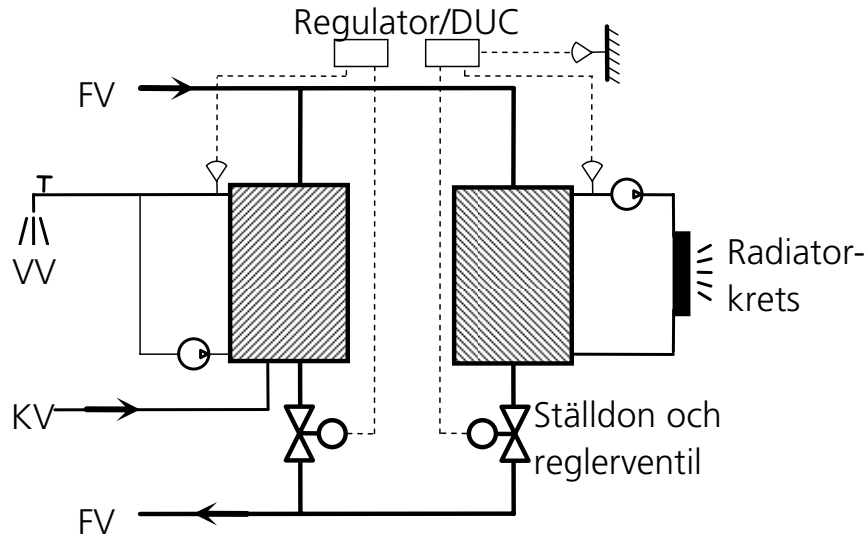
HINDER FÖR SJÄLVCIRKULATION

Följande avsnitt behandlar de begränsningar eller hinder för självcirkulation som träffats på i de studerade objekten.

Hinder i fjärrvärmecentralen

Reglerutrustning

Regleringen av hur mycket värme som överförs i fjärrvärmecentralen, från fjärrvärmenätet till de sekundära systemen, har nämnts inledningsvis. Figur 11 visar en skiss över regleringen av en tappvarmvattenkrets och en radiatorkrets. Det finns en mängd olika så kallade kopplingsprinciper för fjärrvärmecentraler, men de centrala delarna av regleringen är de samma. I regulatorn, som i större fjärrvärmecentraler idag utgörs av en så kallad datorundercentral (DUC), finns börvärden för tappvarmvattentemperaturen och framledningstemperatur till radiator- och ventilationssystem. Medan tappvarmvattnet har ett konstant börvärde, så varierar framledningstemperaturen till radiatorerna under året. Till detta används en temperaturkurva där den önskade framledningstemperaturen bestäms beroende på utetemperatur. Eftersom inte byggnaden reagerar omedelbart på en förändrad utetemperatur så dämpas värdet på utetemperatur beroende på byggnadens värmetröghet. Utetemperatur kan även kompenseras för aktuell vindhastighet och solinstrålning. Reglerautomatiken jämför ärvärdet, alltså den uppmätta temperaturen på det utgående sekundära flödet från värmeväxlaren, och jämför detta med börvärdet. Regulatorn skickar en signal till ställdonet som i sin tur manövrerar ventilspindeln varvid ventilens öppningsgrad förändras. De streckade linjerna i figuren representerar således mät- respektive styrsignaler.



Figur 11 Översiktlig bild av värmeväxlare och reglering i en fjärrvärmecentral.

Som tidigare nämnts förekommer även självverkande reglering i fjärrvärmecentraler, dock främst i samband med tappvarmvattenreglering. Självverkande radiatorreglering kan förekomma i gamla fjärrvärmecentraler. En sådan central förekom i ett av fältförsöken.

Nedanstående analys av olika typer av ställdon och deras funktion vid elavbrott baseras på samtal med olika fabrikanter ([58], [59], [60], [67], [57], [68], [61] och [64]) och studier av deras datablad samt handböckerna [22] och [30].

Ställdonet som manövrerar ventilspindeln kan ha antingen en elektromekanisk, elektrohydraulisk eller elektromagnetisk ställmotor. Både de elektromekaniska ställdonen, som är de klart vanligaste, och de elektrohydrauliska ställdonen, som är mindre vanliga, saluförs antingen med så kallad treläges (även öka/minska) styrsignal eller med modulerande (även kontinuerlig, proportionell) styrsignal. Treläges styrsignal innebär att ställdonet öppnar om det får spänning på en specifik ingång och att det stänger om det får spänning på en annan ingång. Ingen spänning innebär att ställdonet förblir stilla. Idag är det vanligare med modulerande styrsignal, vilket ger snabbare reglering. Ställdonet får då en styrsignal i ett intervall, till exempel 0-10 V, som svarar mot ventilens öppningsgrad. 0 V svarar då mot stängd ventil medan 10 V motsvarar fullt öppen ventil. 5 V motsvarar 50 procent öppningsgrad om ventilen är linjär, men ventilen kan också ha en annan karakteristik.

Av detta framgår att trelägesställdonet stannar i sitt läge vid ett elavbrott medan det kanske inte är lika uppenbart hur det ställdonet med modulerande styrsignal fungerar. 0 V motsvarar ju stängd ventil, varför man skulle kunna misstänka att ventilen stänger vid elavbrott. Dock kräver motorn som driver ventilspindeln spänning för att kunna stänga ventilen. Därför stannar även denna ventil i sitt befintliga läge om inte ställdonet är utrustat med lägesåterföring, vilket innebär att ventilen tvingas till stängning med fjäderkraft eller genom att ett batteripaket driver ställdonet till stängning. Både ställdon med treläges respektive modulerande styrsignal saluförs i utföranden antingen med eller utan lägesåterföring. Ställdon med lägesåterföring rekommenderas för tappvarmvattenreglering.

Då lägesåterföringen innebär en merkostnad används dessa inte i sammanhang då denna funktion inte efterfrågas, såsom i radiatorsystem.

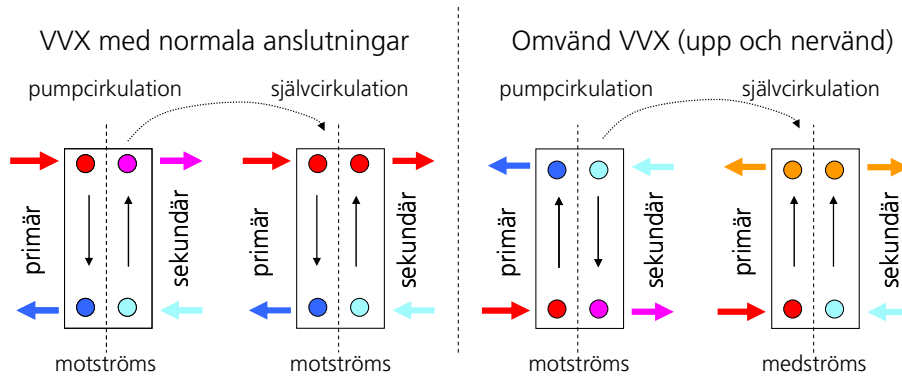
Den tredje typen av ställdon, de elektromagnetiska, innebär emellertid en komplikation med avseende på detta arbete. I dessa ställdon skapas ett magnetfält med hjälp av en spole. Den magnetiska kraften agerar för att överbrygga en fjäderkraft som vill stänga ventilen. Denna typ av ställdon är mycket snabba och har genom sin konstruktion lägesåterföring, dvs. om spänningen blir noll stänger ventilen genom fjäderkraften. De är dyrare och är mindre vanliga, i synnerhet i uppvärmningssystem. I samband med våra självcirkulationsförsök har dock elektromagnetiska ställdon påträffats.

Datorundercentraler (DUC), som vanligtvis används i flerbostadshus och lokaler för att styra och övervaka VVS-systemen i byggnaden, är normalt utrustade med batteribackup. Denna gör enbart att DUC:en kan hålla sitt minne och klocka under ett elavbrott, inte att den fortsätter att reglera ventiler.

Avslutningsvis kan konstateras att i de allra flesta fall stannar styrventiler i sina befintliga lägen och utgör därmed inget direkt hinder för självcirkulation. Självstängande ventiler kan förekomma, antingen i form av elektromagnetiska ställdon eller genom att ett ställdon utrustat med lägesåterföring har placerats i en uppvärmningskrets. Svensk Fjärrvärme har, som ett resultat av detta arbete, infört i sina rekommendationer att styrventiler för värme bör stanna befintligt läge, [53]. Som redan nämnts finns sedan tidigare en rekommendation om att styrventiler för tappvarmvatten bör stänga på grund av skållningsrisken.

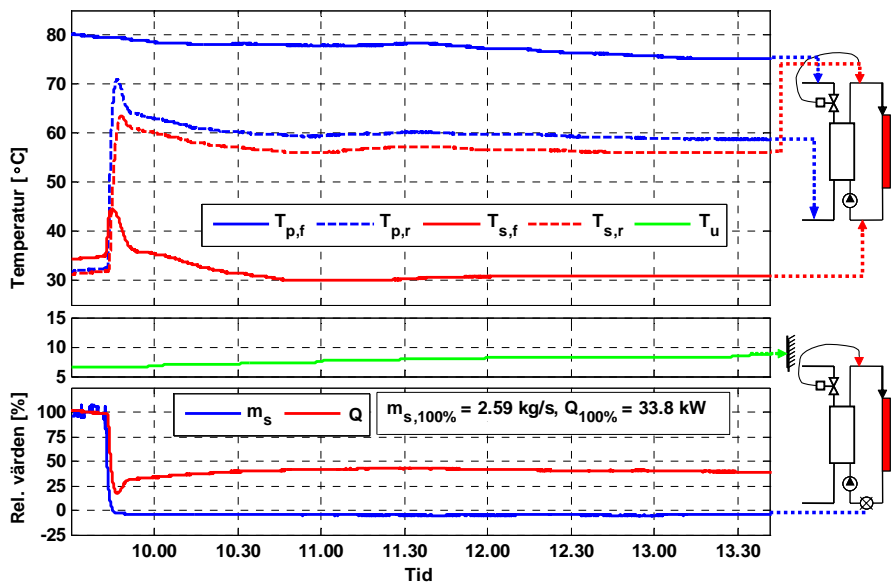
Felvända värmeväxlare

Normalt ansluts den primära och den sekundära framledningen i toppen av värmeväxlaren. I samband med fältförsöken påträffades en typ av fjärrvärmecentral som hade framledningarna anslutna nedtill i värmeväxlaren. Detta har ingen praktisk betydelse vid normal drift av fjärrvärmecentralen. Den beter sig däremot annorlunda vid självcirkulation. Som visats tidigare minskar sekundärflödet avsevärt och blir mycket varmt. Utan pumpen i drift stiger då det heta vattnet i värmeväxlare och lämnar den upptill, vilket resulterar i ett omvänt cirkulationsflöde. Detta innebär att värmeväxlaren arbetar som en medströmsväxlare istället för motströmsväxlare, se Figur 12. I en motströmsväxlare kan den utgående sekundära temperaturen aldrig överstiga den inkommande primära temperaturen. I en medströmsväxlare begränsas dock den utgående sekundära temperaturen av den utgående primära temperaturen. Man kan säga att värmeväxlingen är mindre effektiv eftersom man förlorar i temperaturnivå.



Figur 12 Normal värmeväxlarkonfiguration (vänster) respektive omvänd (höger).

Resultatet från ett själv-cirkulationsförsök med en sådan typ av värmeväxlare visas i Figur 13. Notera att omedelbart efter pumpstoppet börjar den sekundära framledningstemperaturen stiga men den sjunker snabbt igen och passeras av den sekundära returtemperaturen som istället blir den utgående sekundära temperaturen. Den begränsas dock av den primära returtemperaturen. Flödet blir som sagt negativt men även relativt litet i absoluta tal. Det beror dels på den begränsade temperaturdifferensen men sannolikt även dels på att strömningsförhållandena i systemet inte är optimala för omvänd strömning. Till exempel strömmar vattnet in nedtill i radiatorerna, kyls av och lämnar radiatorn upptill vilket motverkar själv-cirkulationen.



Figur 13 Själv-cirkulation med omvänd värmeväxlare.

Vid motströmsväxling skulle den sekundära framtemperaturen sannolikt ha varit 10-15 grader högre, vilket skulle ge 40-60 procent mer utmatad effekt. Det negativa flödet är förhållandevis lågt i jämförelse med övriga testobjekt, ungefär 5 procent av det normala. I den normala strömningsriktningen är det rimligt att anta att flödet skulle ha varit avsevärt större. Vid försöket uppgick den relativa värmeförseln till 40 procent, men borde kunna

vara åtminstone det dubbla genom att ha en annan typ av fjärrvärmecentral, utan den ”felvända” värmeväxlaren. En annan nackdel med den här fjärrvärmecentralen är att den primära returtemperaturen blir väldigt hög i en elavbrottsituation.

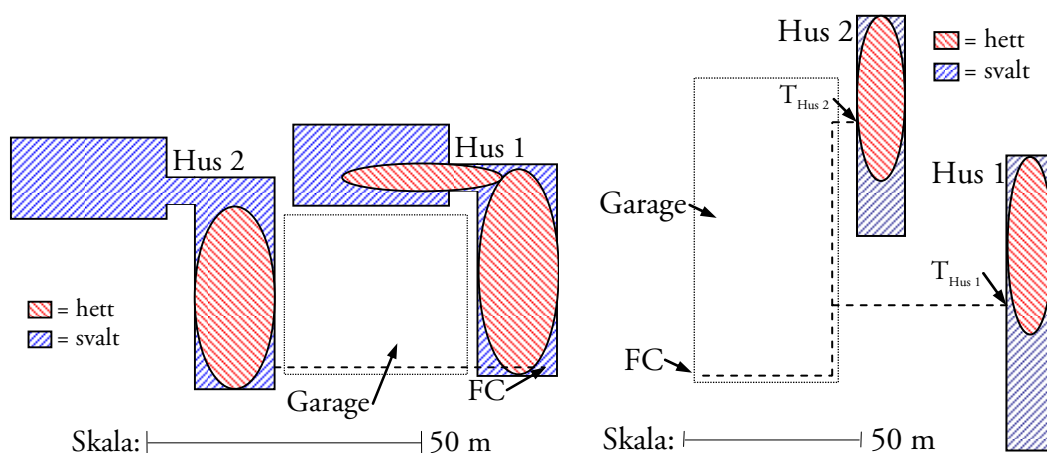
Det testade objektet var ett äldreboende, byggt 1999 i tre våningar. Ett annat liknande objekt med samma typ av fjärrvärmecentral testades också med liknande resultat.

Enligt tillverkaren finns inte denna typ av fjärrvärmecentral längre i sortimentet. Däremot finns en annan central med omvänd värmeväxlare. Konstruktionen är dock ovanlig och beror i förekommande fall på att en enklare rördragning kunnat åstadkommas.

Fördelning i hus

I det inledande exemplet föreföll värmen fördelas väl i radiatorsystemet vid själv-cirkulation. Vissa av de övriga undersökta systemen har dock visat problem med att få cirkulation i hela systemet. Figur 14 visar en översiktlig bild av hur väl värmedistributionen nådde ut i två större objekt. Båda systemen byggdes på 1970-talet och har en hel del likheter: Objekten är relativt stora, de har sex våningar och 143 respektive 196 lägenheter. I båda fallen förses två huskroppar med värme från en gemensam fjärrvärmecentral och systemen har långa horisontella ledningar som löper genom garage och eller under jord. Systemen är av ettrörstyp, i det ena är radiatorerna i varje lägenhet seriekopplade i en slinga, i det andra utgör radiatorerna i två eller tre lägenheter en slinga. Dimensioneringen av rördiametrarna är snål vilket brukar gå hand i hand med ettrörssystem.

I båda objekten i Figur 14 uppnåddes en värmelast på ungefär 50 procent av nivån före försöket. Som man kan se i figuren nådde värmen ut i ungefär hälften av systemet. Med hjälp av mätningar på stammarna i källarplanet och genom att för hand känna på stammarna och föra anteckningar är det möjligt att uppskatta vart värmen når eller inte. (De stammar som inte får någon cirkulation svalnar av och känns efter ett tag kalla medan de som får cirkulation upplevs som heta.) Det förefaller alltså som att halva systemet fungerar tillfredsställande medan den andra halvan inte fungerar alls.



Figur 14 Översiktlig bild av försöken i två större system, 143 respektive 196 lägenheter.

Drivkraften vid själv-cirkulation är liten, så det är egentligen inte så underligt att en del system fungerar sämre. Frågan är dock vilken faktor som har störst betydelse – att systemen i

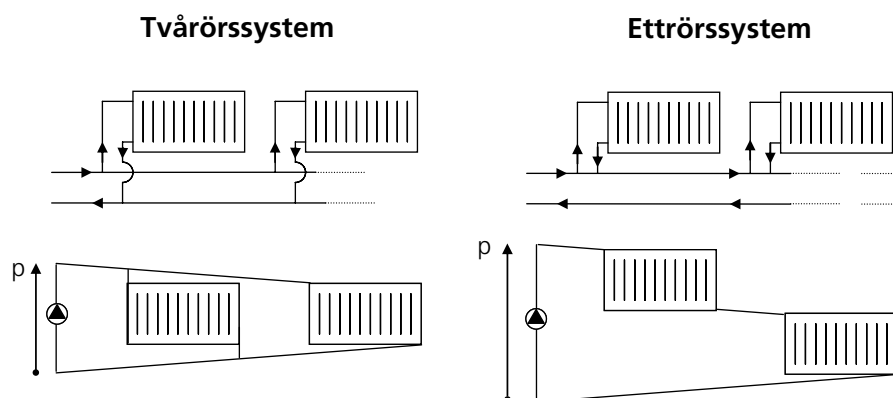
Figur 14 har ettrörssystem, att de har klen dimensionerade rör eller att systemen är stora, med långa horisontella distributionsledningar?

Ettrörssystem och snålt dimensionerade rördiametrar

Den trend som gällde under främst 1970-talet var att konstruera radiatorsystem med låg materialåtgång, vilket resulterade både i många ettrörssystem och i generellt klenare rördiametrar.

Idag är det sällsynt att flerbostadshus byggs med ettrörssystem, medan det förekommer i viss mån bland småhus. Det finns ingen klar statistik över hur vanliga ettrörssystem är, men enligt Petersson m fl [41] är andelen i SABO:s bestånd (Sveriges Allmännyttiga Bostadsföretags Riksorganisation med 1,4 miljoner hyresgäster [70]) ungefär 13 procent.

I tvårörssystemet passerar varje enhet vatten endast en radiator, varför tryckfallet bestäms av summan av tryckfallen i värmeväxlare, distributionsledningar, ventiler och en radiator. I ettrörssystemet passerar varje enhet vatten en radiatorslinga vilket innebär att tryckfallet blir avsevärt mycket högre. I det sistnämnda objektet i exemplet ovan ger pumpen ett differenstryck på 14 meter vattenpelare. För ett ge en känsla av hur stort detta drivtryck är kan man exempelvis jämföra med ett annat testobjekt: ett tio våningshus med 105 lägenheter som byggdes 1960, där pumptrycket är 2 meter. Till den stora skillnaden bidrar sannolikt även de klenare rördiametrarna.

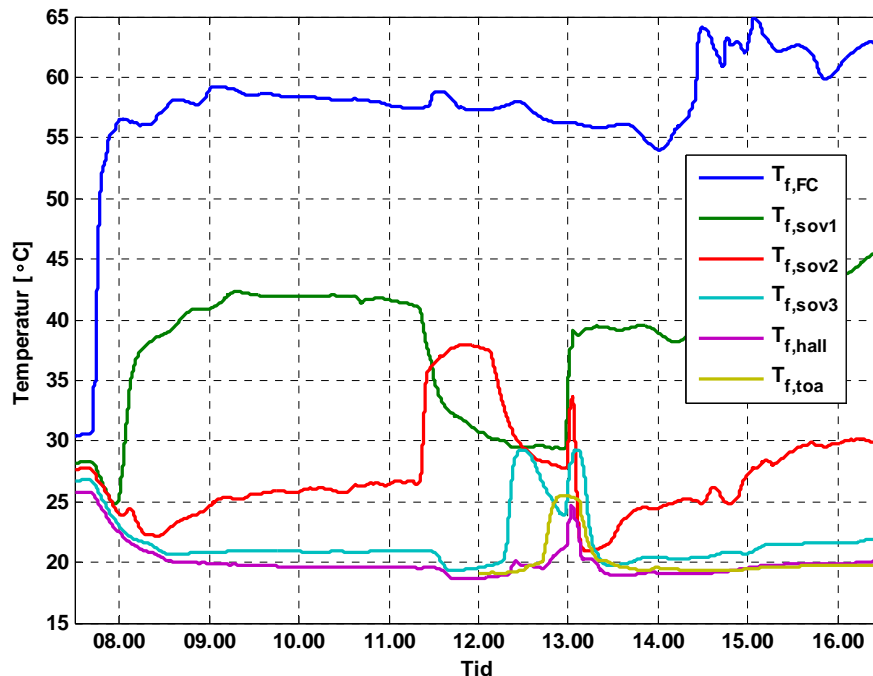


Figur 15 Funktionen i tvårör- respektive ettrörssystem. Tryckfallet blir högre i ettrörssystem.

Ytterligare ett ettrörssystem har testats, i ett småhus byggt 1998. Huset har två plan och fjärrvärmecentralen är belägen på bottenvåningen. Radiatorsystemet består av en radiatorslinga på respektive våningsplan. Huset är för övrigt anslutet till ett sekundärt fjärrvärmenät vilket innebär att det har en lägre primär framledningstemperatur. (Sekundära nät kommer att diskuteras längre fram.)

Då nivån för radiatorslingan på bottenvåningen ligger ungefär en meter under fjärrvärmecentralen, och därmed saknar drivhöjd, får denna ingen cirkulation alls. All den inmatade effekten, som uppgick till ungefär 45 procent av initiala, går istället till slingan på övervåningen. I denna avges i sin tur nästan all effekt i de första två radiatorerna, vilket åskådliggörs i Figur 16 nedan. Kurvan som håller högst nivå (blå) motsvarar temperaturen som lämnar fjärrvärmecentralen, näst högst nivå (grön) motsvarar temperaturen fram till

första radiatoren. Man kan också se att den andra radiatoren (röd) har en något förhöjd framtemperatur jämfört med resterande tre radiatorer. Strax efter klockan 11 (indikerat med den första streckade, vertikala linjen) stängs den första radiatoren av vilket får till följd att värmefronten nästan omedelbart flyttas till den andra radiatoren. En knapp timme senare (den andra streckade, vertikala linjen) stängs även denna radiator och man kan se hur värmefronten vandrar vidare till den tredje radiatoren. Därefter öppnas åter samtliga radiatorer. Nivåskillnaderna, dels från fjärrvärmecentralen till första radiatoren, och dels mellan radiatorernas framtemperatur då de fungerar som första radiator i slingan, visar att värmeavgivningen från rören är mycket hög.



Figur 16 Självcirkulation i småhus med ettrörssystem. Framledningstemperaturer i radiator slingan på övervåningen.

Av husets initiala värmeförsel kvarstår alltså 45 procent som i huvudsak går till de två första radiatorerna på övervåningen och distributionsledningarna till dessa. Eftersom den primära framledningstemperaturen är åtminstone tjugo grader lägre på grund av att huset är anslutet till ett sekundärnät borde effekten ha uppgått till 55-70¹ procent vid en primär

¹ Man kan göra en uppskattning utifrån temperaturnivåerna och genom en jämförelse med andra testade objekt. Den primära framledningstemperaturen låg kring drygt 60°C och den sekundära framledningstemperaturen kring knappt 60°C. Radiatorsystemets returtemperatur låg kring 20°C, vilket ger ett temperaturfall på 40°C. En tjugo grader högre primär framledningstemperatur skulle sannolikt ge mellan 10-20°C högre sekundär framledningstemperatur, motsvarande en effektökning på 25-50 procent. Det är möjligt att självcirkulationsflödet då också ökar, å andra sidan medför det i så fall en sänkt framledningstemperatur på grund av den minskade uppehållstiden i värmeväxlaren.

fjärrvärmeanslutning. Om man även väger in att endast den ena radiatorslingan var tillgänglig (beroende på höjdförhållandena) kan man konstatera att självcirkulationen fungerar ganska väl trots att systemet är av ettrörstyp.

Både de stora flerbostadshusen och småhuset har vissa likheter: självcirkulationen fungerar väl i de delar av systemet den når fram till. Man kan invända att den mesta värmen avges i början av slingan vilket innebär att man kanske får tränga ihop sig i de rum som är varma i en kritisk situation.

Övriga nyare byggnader som testats visar inte heller att man kan slå fast att de klenare rördimensioner som används idag, jämfört med tiden fram till början av 1960-talet, nämnvärt skulle försämra förutsättningarna för självcirkulationen. Egentligen är det inte heller så underligt om man funderar på vilka fysikaliska samband som råder mellan tryckfall och flöde vid rörströmning. I hydrauliska system antas tryckfallet, vid fullt utvecklad turbulens, vara proportionellt mot volymflödet i kvadrat, se till exempel [24] eller [56]. I de flesta testobjekt har självcirkulationsflödet uppgått till 10-15 procent av det normala cirkulationsflödet. En tiondel av flödet innebär att tryckfallet vid självcirkulation endast blir en hundradel av det normala tryckfallet. Visserligen är drivtrycket vid självcirkulation bara 2-3 procent av det normala (se avsnittet Mekanism i kapitlet Självcirkulation), men detta visar att trånga radiatorsystem inte behöver vara lika begränsande som de framstår vid en första anblick.

Inverkan av längd och höjd på byggnaden

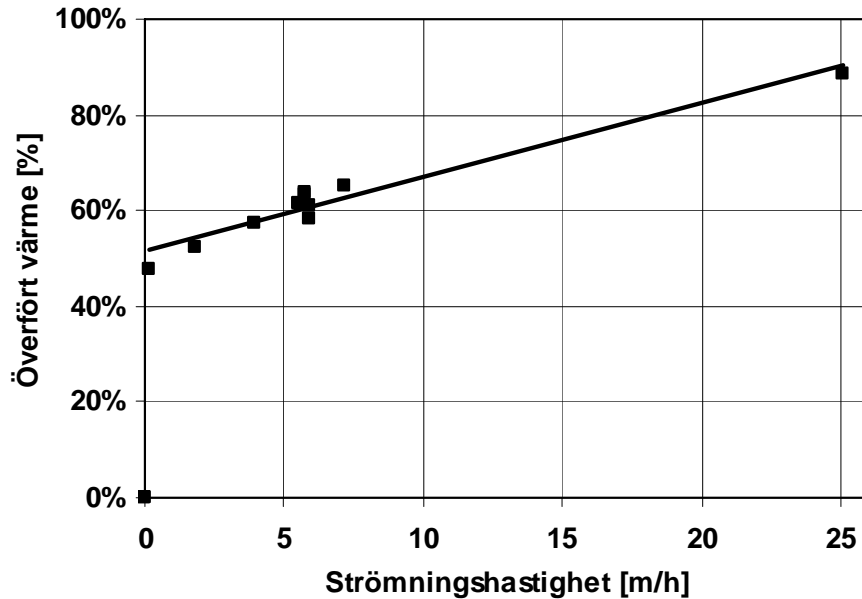
Att döma av resultatet i Figur 14, så är det systemens storlek, eller snarare utbredning, som tycks vara problemet. Hälften av systemen tycks få god värmeförsörjning medan resterande delar inte får någon värme alls (eller mycket lite).

En begränsning vid de genomförda självcirkulationsförsöken är att försöken inte kan fortgå mer än några timmar för att inte riskera inomhuskomforten för de boende eller för verksamheter i byggnaderna. Generellt har ändå vad som kan beskrivas som stabila tillstånd uppnåtts i de testade systemen. Likväl är det befogat att fundera kring vad som händer i system i vilka självcirkulation endast har etablerats i begränsad utsträckning. Är det möjligt att avsvalnade stammar kommer igång efterhand?

För att undersöka denna möjlighet genomfördes ett laborationsförsök för att studera värmetransport genom ett normalisolerat rör vid stillastående vatten eller vid mycket små strömningshastigheter. Blir värmeförlusterna till omgivningen för stora eller kan värmen nå en ny stam och där utnyttja drivhöjden?

Det visar sig att värmetransport fungerar mycket dåligt i rör med stillastående vatten. Värmet leds först och främst genom rörmaterialet, som längst någon meter, och det mesta går förlorat till omgivningen.

Därefter genomfördes en parametervariation där små flöden studerades för att finna den lägsta strömningshastighet som kan transportera en värmefront utan att den går förlorad. Den lägsta testade strömningshastigheten är 0,05 mm/s vilket innebär ett flöde på 0,00001 l/s. Vid denna hastighet kan värme transporteras genom röret även om värmeförlusten är betydande, ungefär hälften av värmets värme går förlorat till omgivningen. Figur 17 visar resultatet av parameterstudien.

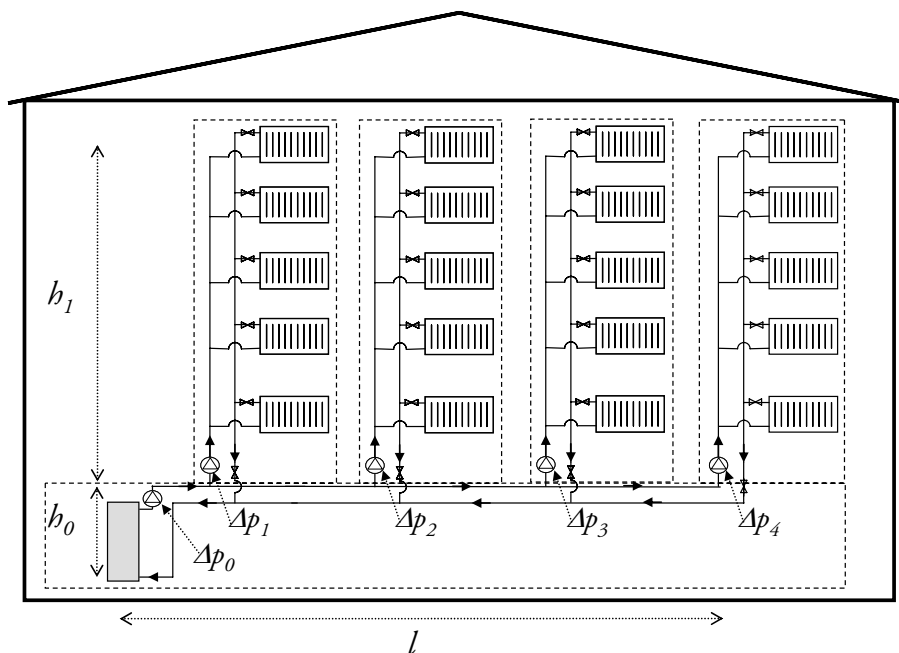


Figur 17 Resultat av laborationsförsök. Diagrammet visar hur mycket värme som kunde transporteras genom röret vid olika strömningshastigheter utan att gå förlorad som värmeförlust.

Slutsatsen är att redan ett oerhört litet flöde kan transportera en värmefront utan att allt värme går förlorat till omgivningen. Följaktligen tycks det finnas potential att få ut en varm front i ett stort system även om strömningshastigheten är låg och värmeförlusterna blir betydande. Ändå har vi i fältförsöken sett att man inom en rimlig tid (några timmar) uppnår ett relativt stabilt tillstånd i de testade systemen. Det skulle ta mycket lång tid att se resultatet av ett mycket långsamt krypflöde.

Det finns även andra faktorer som har visat sig inverka på hur långt ut i systemet värmen kan nå. En viktig parameter är förhållandet mellan det tillgängliga drivtrycket och tryckfallet i den horisontella distributionen och höjden på stammarna och tryckfallet i dessa. Eller uttryckt med andra ord: förhållandet mellan höjden på värmeväxlaren, h_p , och höjden respektive längden på systemet, h_l respektive l . Variablerna är indikerade i Figur 18 nedan. Vid en första anblick kan man anta att självcirkulationen enbart gynnas av höga stammar eftersom drivkraften är proportionell mot höjden, något som inte behöver vara fallet.

Vattnets densitetsskillnad gör att man kan säga att systemet har många små skenbara cirkulationspumpar i de punkter där det finns en drivhöjd, d v s i varje stam (förutsatt att det finns en temperaturdifferens mellan fram- och returledning) och vid fjärrvärmecentralen, se Figur 18. Den här effekten finns alltid närvarande i systemet, även vid pumpdrift, dock är den så liten att den då kan försummas.

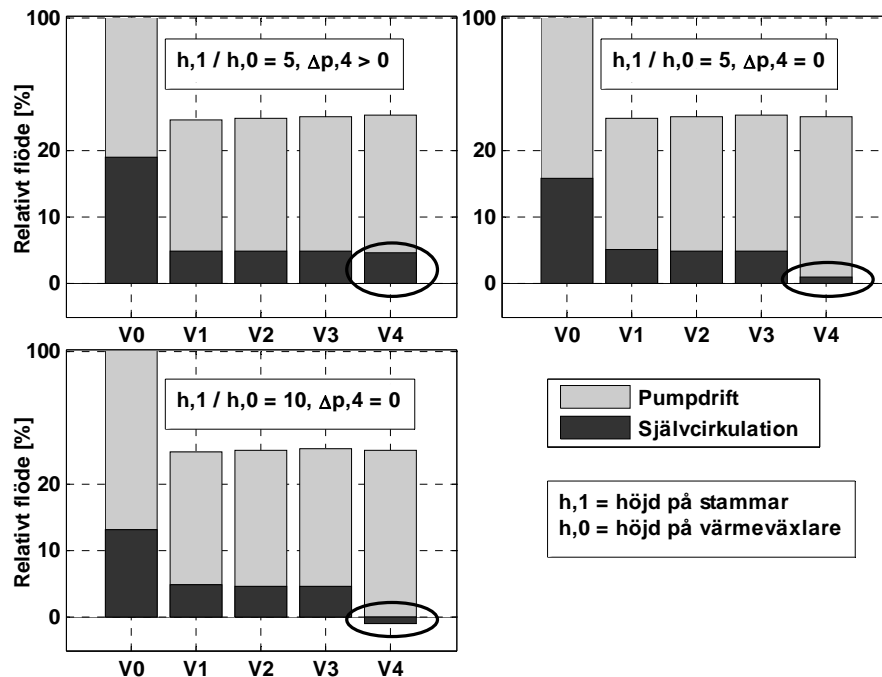


Figur 18 Översiktlig bild av radiatorsystem där höjden på värmeväxlaren, h_0 , respektive stammarna, h_1 , och längd, l , samt de virtuella pumpar som beror på vattnets densitetsskillnad har indikerats.

Betrakta nu ett extremfall med ett system som har en mycket hög drivhöjd vid värmeväxlaren, en begränsad horisontell utbredning och en låg höjd på stammarna. Då får man ett system med förhållanden som liknar pumpdrift, d v s att det huvudsakliga differensstrycket uppstår vid fjärrvärmecentralen. Omvänt kan vi tänka oss ett system med en låg drivhöjd i källarkretsen medan stammarna är mycket höga. Värmen får då svårt att nå ut i hela systemet. Inverkan av att "pumparna" på de fungerande stammarna är betydligt högre än "pumpen" vid värmeväxlaren gör att man faktiskt kan få ett negativt flöde i en eller flera stammar efter den sista fungerande stammen. Ju högre höjdskillnad i fjärrvärmecentralen, desto högre drivtryck i den horisontella distributionen (källarkretsen) och desto längre ut når flödet. Enligt samma resonemang inverkar en byggnad med lång horisontell utbredning negativt på flödesfördelningen. Stammar med högt drivtryck tenderar att "suga" flöde från nästkommande stammar. Nedan följer resultatet av ett räkneexempel följt av ett praktiskt resultat för att illustrera fenomenet. Ett smidigt sätt att göra en sådan beräkning är att hantera systemet som ett kretsschema. Teorin för beräkningen redovisas i Bilaga B – Bakgrund till beräkningar. Systemet är förenklat och antas bestå av fyra stammar vars flöden betecknas V_1 , V_2 , V_3 och V_4 medan det totala flödet betecknas V_0 .

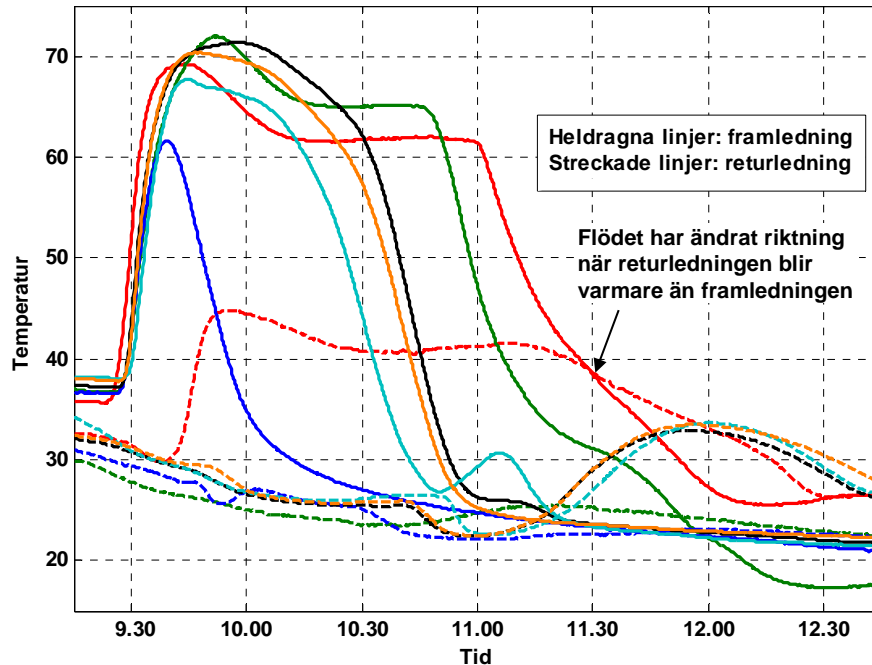
Genom att använda realistiska parametervärden (motsvarande systemet som visades i Figur 7) får man resultatet som visas i det första diagrammet i Figur 19. De grå staplarna visar det relativa flödet vid normal (pump-) drift (V_0 är det totala flödet och är således 100 procent). De svarta staplarna motsvarar flödena vid självциркуlation. Som textrutan indikerar så antas att stammarna här är fem gånger högre än värmeväxlaren och att vi har en temperaturdifferens, och alltså även en tryckdifferens, vid alla stammar. Självциркуlationsflödet är ungefär 25 procent och jämnt fördelat i systemet. Om vi nu tittar på nästa diagram (uppe till höger) så är höjdförhållandet fortfarande detsamma men nu antas

att den varma temperaturfronten som är typisk vid självcirkulation inte har nått fram till den sista stammen, vilket kan vara fallet om differenstrycket i den horisontella distributionen inte räcker till. Den sista stammen får därför ett avsevärt mycket lägre flöde. I det sista diagrammet är tryckförhållandena de samma som i föregående diagram medan höjdförhållandet är förändrat. Nu antas stammarna vara tio gånger högre än värmeväxlaren. Resultatet är att flödet i den sista stammen blir negativt.



Figur 19 Flödesfördelning i radiatorsystemet beroende på om det finns en temperaturskillnad vid sista stammen (första diagrammet) och förhållandet mellan höjden på värmeväxlaren och stammarna (5 i diagram 1 och 2, 10 i diagram 3).

Det faktum att flödet kan ändra riktning i vissa stammar belägna långt från fjärrvärmecentralen kunde dokumenteras i ett av de studerade objekten. Byggnaden har tio våningar och 100 lägenheter. Fjärrvärmecentralen är placerad så att ungefär en tredjedel av byggnadens yta finns i ena riktningen och två tredjedelar i den andra riktningen. Värmetillförseln uppgick till ungefär 85 procent men värmen nådde inte den mest avlägsna tredjedelen av byggnaden. I Figur 20 visas fram- och returledningstemperaturer på sex stammar belägna kring den punkt dit värmen når som längst. Då "elavbrottet" infaller vid 9.30 får alla stammarna i figuren en förhöjd temperatur. Vid varierande tidpunkter kan man däremot se att framtemperaturen faller och i några blir returtemperaturen högre. En returtemperatur som är högre än framtemperaturen indikerar att flödet i den aktuella stammen har bytt strömningsriktning.



Figur 20 Mätning på stammar vid försök med självcirculation. Flödet har bytt riktning då returledningen (streckad) är varmare än framledningen.

Vad kan man då förvänta sig för konsekvenser av att flödet kan vända i vissa stammar? Det negativa flödet är i sig inget egentligt problem, men det är viktigt att känna till att i vissa byggnader kan självcirculationen fungera utmärkt i vissa delar medan andra inte får någon värme alls. Detta bör man ha i åtanke för byggnader, eller radiatorsystem, som är mycket höga och/eller horisontellt utsträckta.

Eftersom fungerande stammar i ettrörssystem tycks fungera ganska väl och då tryckfallen relativt sett blir små vid låga tryckfall förefaller det sannolikt att den vertikala och horisontella utbredningen av radiatorsystemen är mer avgörande än tryckfallet i systemet (ålder/rördiametrar och ett- eller tvärörssystem). Genom att stänga av vissa stammar kan man däremot påverka flödesfördelningen. Detta beskrivs närmare i avsnittet Information till berörda parter.

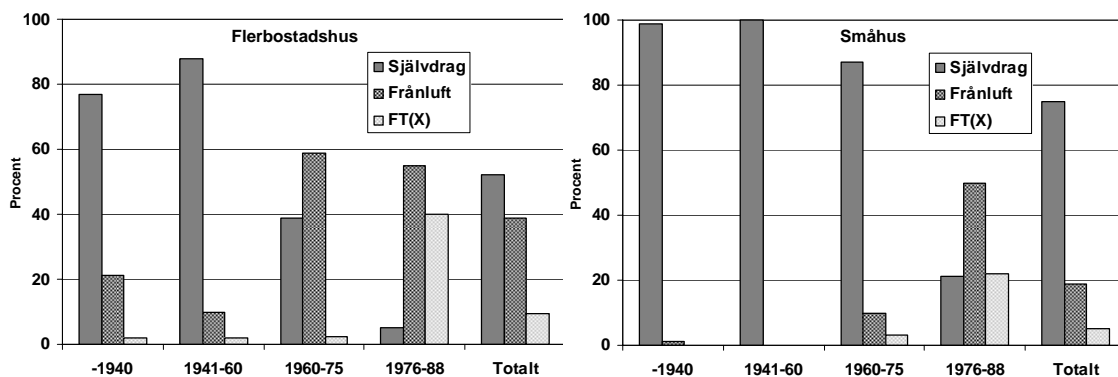
Ventilation

Den vanligaste typen av ventilation i bostadshus är självdragsventilation (S) eller frånluftsventilation (F). Det innebär att tilluften inte värms upp innan den når byggnadens rum utan all uppvärmning sker via radiatorsystemet. I lokalbyggnader är från- och tilluftsventilation (FT) däremot mycket vanligt. Till skillnad från självdrag och frånluft, där tilluft sugs in genom tilluftsdon och otätheter i husväggarna, har man med tilluftsventilation ett kanalsystem för tilluften. Tilluftssystemet medger att luften kan förbehandlas. Till exempel har man i regel en värmeväxlare som återvinner en del av värmen i frånluften genom att denna förvärmer tilluften (FT benämns då FTX). Utöver värmeåtervinningen behöver tilluften ofta värmas ytterligare, vilket sker i ett värmebatteri där luften värmeväxlas mot varmt vatten. Om det råder ett kylbehov i byggnaden kan luftbatteriet vara utrustat med en kylkrets som kyler tilluften. Många lokalbyggnader i Sverige har ett större kylbehov än

uppvärmningsbehov över året på grund av överskottsvärmen från kontorsutrustning, solinstrålning och människor [1].

Vad händer då med ventilationen vid ett elavbrott? Kort sagt är det bara självdragsventilation som är opåverkad vid ett elavbrott och i de byggnader som har en annan typ av ventilation avgörs dess funktion av möjligheterna till självdragsventilation.

Figur 21 visar förekomsten av olika ventilationssystem i bostadshus. Skrivsättet FT(X) innefattar både från- och tilluftssystem som saknar eller som har värmeåtervinning. Till vänster visas fördelningen bland flerbostadshus och till höger fördelningen bland småhus. Statistiken [5] sträcker sig inte längre än till och med 1988 men omsättningen av våra bostäder är långsam. Man ser i den sista kategorin, 1976-1988, att självdragsventilation i nya byggnader nästan helt har ersatts av mekanisk ventilation. Eftersom självdrag har varit det dominerande ventilationssystemet under lång tid, står den dock fortfarande för mer än hälften bland flerbostadshusen och mer än tre fjärdedelar bland småhusen.



Figur 21 Fördelning av ventilation i flerbostads- (vänster) respektive småhus (höger). [5]

Det är svårt att finna samlad statistik över ventilationen i lokalbyggnader. Denna grupp består av byggnader för en mängd olika verksamheter (skola, förvaltning, vård, kontor, handel, fritid etc). I *Energianvändning i vårdlokaler* [17] finns statistik över ventilationssystemen i landets vårdlokaler. Där framgår att mekanisk ventilation används i 99,5 procent av vårdlokalerna i Sverige och att någon form av tilluftsventilation förekommer i drygt 97 procent av byggnaderna. Utbredningen av självdragsventilation i lokaler är sannolikt mycket begränsad.

Ett självdragssystem medger inga direkta möjligheter till reglering av ventilationen. Ett av systemets nackdelar är just att man ofta får för låg luftomsättning på sommaren och för hög omsättning på vintern. Drivkraften för självdrag är dels skillnaden mellan inne- och utetemperatur, dels höjdskillnaden mellan luftintag och luftutsläpp samt vindhastigheten. I en kritisk elavbrottsituation, med kallt och blåsig väder, riskerar därför byggnader med självdrag en snabbare avkylning. I viss mån kan man säga att detta uppvägs av att det företrädesvis är äldre byggnader som har självdrag, byggnader som generellt uppvisat goda resultat vid självdragsventilationstest. Dessutom kan boende till viss del begränsa ventilationsflödena genom att tillfälligt täppa till luftintag och frånluftsdon [4].

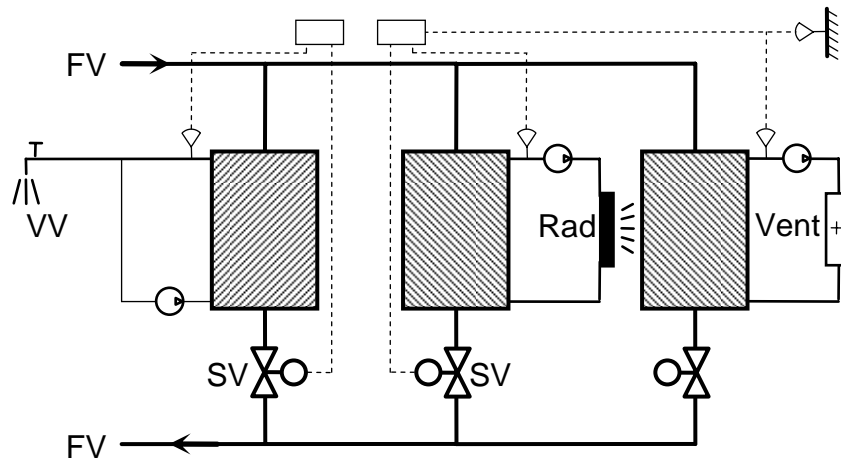
Frånluftssystem använder en frånluftsfläkt för att suga ut luften och medger därför ventilationskanaler med mindre diametrar. Möjligheten till självdrag i ett sådant system är begränsad på grund av det ökade motståndet i kanalerna men även på grund av stillastående frånluftsfläktar. Det är därför högst sannolikt att ventilationsflödet minskar och därmed även byggnadens värmeförluster.

I från- och tilluftssystem, FT och FTX, är möjligheterna till självdrag ännu mer begränsade. Även om inte systemet har värmeåtervinning, vilket signifikant ökar strömningsmotståndet, så passerar tilluften ett värmebatteri som knappast kan släppa igenom något betydande flöde [4]. Dessutom är ventilationssystem i regel utrustade med självstängande spjäll (jämför med självstängande styrventiler) för att undvika förfrysning av batterierna ([57], [61], [64] och [68]).

Säkrare värmeförsörjning!, [4], innehåller omfattande beräkningar för utkylningshastigheter i olika typer av byggnader. Där förs också resonemang kring valet av luftomsättningar i de olika typerna av byggnader. För självdrag vid kall väderlek (-20°C) har en luftomsättningshastighet på 0,75 gånger per timme antagits. I frånluftssystem har 0,3 antagits och i FT(X)-system 0,1 luftomsättningar per timme.

Den förväntade låga ventilationen i FT- och FTX-system får betraktas som positiv ur ett utkylningsperspektiv. Dels för att självcirkulationen i dessa byggnader ofta fungerar lite sämre än i gamla byggnader (bland annat på grund av shuntgrupper, som visas nedan) men även därför att dessa byggnader ofta har ett betydande internt genererat värmetilskott. Det kommer både från de personer som vistas i byggnaden och genom solinstrålning men framför allt från kontorsutrustning. Den sistnämnda posten försvinner förstås vid ett elavbrott och den är dessutom klart större än motsvarande värmetilskott från elektrisk utrustning i bostäder.

Ventilationssystem av FT(X)-typ är som sagt ofta anslutna till fjärrvärmecentralen för att tilluften ska kunna värmas till önskad inblåsningstemperatur. Luftbatterierna kan anslutas på två olika sätt: Ett är att ha en separat ventilationskrets, se Figur 22 där luftbatteriet är anslutet till en ventilationskrets som är parallellkopplad med radiatorkretsen.



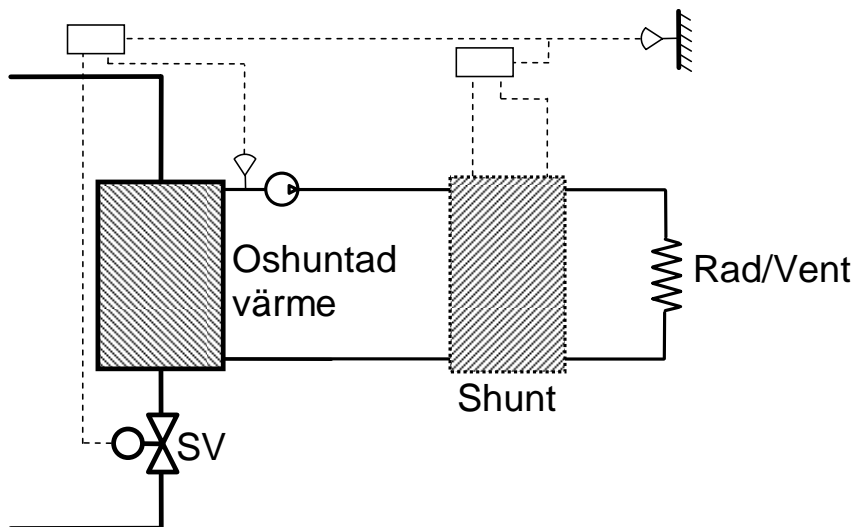
Figur 22 Fjärrvärmecentral med ventilationskrets ansluten till en ventilationskrets som är parallellkopplad med radiatorkretsen.

Om ventilationskretsens styrventil stannar i sitt befintliga läge kommer värmeväxlare att fortsätta att värmas av fjärrvärmevatten. Möjligheten att överföra värme till ventilationssystemet beror på om flödet i kretsen får någon avkylning i luftbatteriet. Eftersom luftflödet kommer att bli mycket lågt eller inget alls (självstängande spjäll) kommer vattenflödet sannolikt inte få någon påtaglig avkylning. Därmed fås heller knappt någon drivkraft för självcirkulation.

Ett annat vanligt sätt att ansluta ett luftbatteri är att koppla det till en gemensam krets tillsammans med andra luftbatterier och radiatorkretsar, vilket leder oss in på nästa avsnitt, Shuntkopplingar.

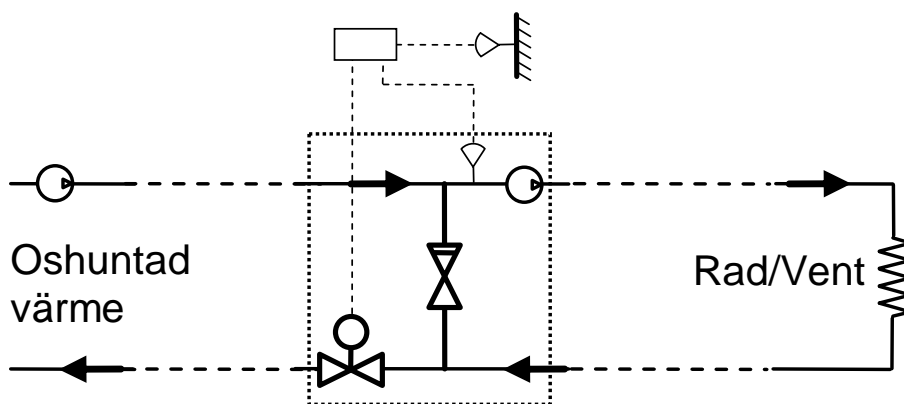
Shuntkopplingar

I större lokalbyggnader är det vanligt att man ansluter både radiatorsystem och ventilation till en gemensam så kallad krets som är förlagd i hela byggnaden. Till denna är vanligen flera separata radiator- och ventilationskretsar anslutna. Även exempelvis golvvärmesystem kan anslutas med en shuntgrupp. Olika system har olika krav på temperaturkurva och flöde, varför den gemensamma kretsen regleras så att dess flöde och framledningstemperatur ska klara alla undersystemens behov. Systemen ansluts med shuntkopplingar som gör att man kan välja önskade värden på framledningstemperatur och flöde i kretsen, se Figur 23.



Figur 23 Radiator- och ventilationssystem anslutna till gemensam värmekrets med shuntkoppling.

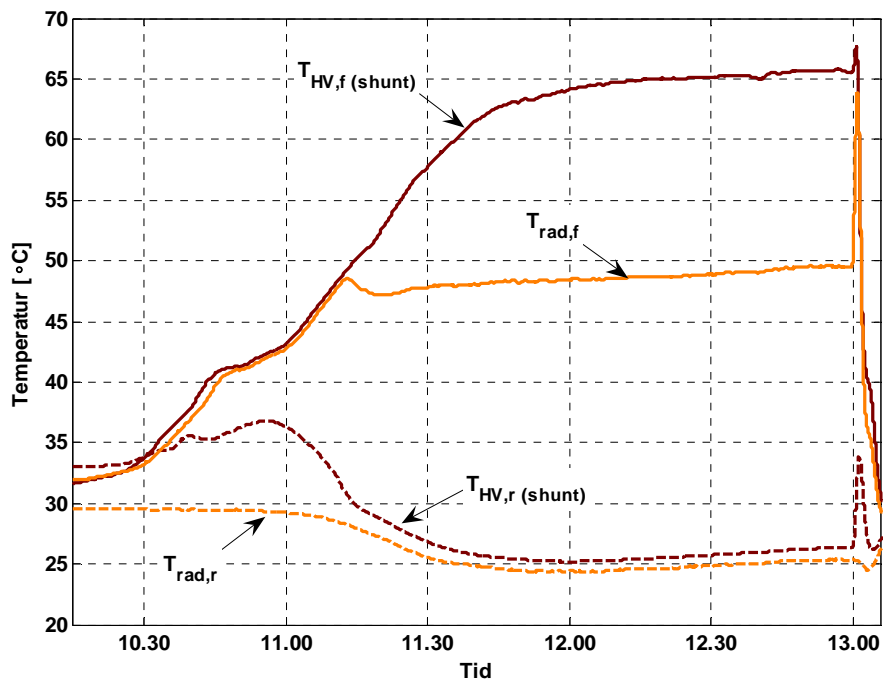
Det finns en mängd olika varianter av shuntkopplingar. Den allra vanligaste kopplingen i samband med fjärrvärme visas i Figur 24. Den har en tvåvägsventil som reglerar framledningstemperaturen i den shuntade kretsen genom att reglera in- och utflödet. Shuntkopplingen är även utrustad med en cirkulationspump och en backventil som förhindrar hydraulisk kortslutning. Denna typ av shuntkoppling arbetar med variabelt flöde i den oshuntade värmekretsen och konstant flöde i shuntkretsarna. På så sätt blir avkylningen hög vilket är önskvärt vid fjärrvärmeanslutning.



Figur 24 Den vanligaste typen av shuntkoppling vid fjärrvärmeanslutning.

Vid ett elavbrott stannar självfallet cirkulationspumpen i shuntkopplingarna. Styrventilerna stannar i sina respektive lägen. Det betyder att vatten från den oshuntade kretsen fortfarande kan passera shunten och nå ut i den shuntade kretsen. För att detta ska ske måste dock differenstrycket i den oshuntade kretsen vara tillräckligt högt. Ofta är denna krets begränsad till ett plan i en byggnad medan de shuntade kretsarna når längst upp i byggnaden. Därför kan differenstrycket i en shuntkrets vara högre än differenstrycket i den oshuntade kretsen (detta beror även på de aktuella temperaturnivåerna). Det är då möjligt att backventilen i shuntkopplingen öppnar och släpper igenom returflöde till framledningen. I så fall blir

framtemperaturen till shuntkretsen lägre än nivån i den oshuntade kretsen. Resultatet från ett fältförsök med shuntkoppling visas i Figur 25. Den högsta temperaturnivån visar de oshuntade framtemperaturen ut från värmeväxlaren. Nästa nivå visar framtemperaturen in i shuntkopplingen, som låg ungefär tio meter från fjärrvärmecentralen. Värmeförlusten är ganska hög eftersom temperaturen sjunkit ungefär 13°C , vilket sannolikt beror på att självcirkulationsflödet var relativt lågt i detta objekt. Ut ur shuntkopplingen har framtemperaturen sjunkit ytterligare, den är nu ungefär 50°C jämfört med knappt 80°C vid fjärrvärmecentralen. Det är troligt att det sker en inblandning av returflöde i shuntkopplingen vilket resulterar i den sänkta temperaturen. Man kan dock ändå konstatera att den utgående temperaturen är tillräcklig för att viss självcirkulation ska uppstå i den shuntkopplade radiatorkretsen.



Figur 25 Fram- (heldragna linjer) och returtemperatur (streckade linjer) vid en shuntkoppling.

Om det är en ventilationskrets som är shuntkopplad är det knappast troligt att något flöde uppstår i kretsen eftersom flödet, i likhet med separat ventilationskrets, på sin höjd får en obetydlig avkylning.

När man bedömer potentialen för självcirkulation i en byggnad ska man vara observant om radiatorkretsarna är shuntkopplade. De kan då avge en lägre effekt än annars. Det hade varit önskvärt att kunna stänga backventilerna, manuellt eller automatiskt för att i möjligaste mån minimera inverkan av shuntkopplingar.

Sekundärnät

I fjärrvärmenät förekommer ibland mindre nät, så kallade sekundärnät. Det kan till exempel vara en gammal panncentral som ersatts av en fjärrvärmecentral. Denna förser ett flertal byggnader (småhus, flerbostadshus eller lokaler) med värme och varmvatten. Sekundärnätet kan också vara ett avgränsat nät med lägre tryck och temperatur än huvudnätet. Dessa nät är

hydrauliskt separerade, men termodynamiskt förbundna, i en värmecentral. Till sekundärnätet är byggnader oftast anslutna via konventionella fjärrvärmecentraler, men kan också vara direkt anslutna. Ett exempel på detta visades i avsnittet om Fördelning i hus, där ett småhus på grund av anslutning till sekundärnät hade en relativt låg framledningstemperatur.

I det första fallet, där husen inte har egna fjärrvärmecentraler kan man tänka sig att viss självcirkulation uppstår men problemet är att man har långa horisontella distributionsledningar vilket sannolikt begränsar spridningen (jämför med avsnittet Fördelning i hus). I det andra fallet, där husen har egna fjärrvärmecentraler, kommer reservkraft att krävas för att kunna cirkulera flödet i sekundärnätet (precis som i huvudnätet). I de anslutna byggnaderna kan självfallet självcirkulation uppstå, även om framledningstemperaturen alltså kommer att utgöra en begränsning. Värmecentraler mellan huvudnät och sekundärnät rekommenderas alltså att förses med reservkraft om man vill skydda byggnaderna i sekundärnätet mot utkyllning. Genom att sätta in reservkraft i en enda punkt kan man då tillgodose delar av värmebehovet i många byggnader.

Övriga hinder

Golvvärme har blivit allt vanligare i nybyggnationer. Även dessa system bör i princip kunna få självcirkulation men det finns anledningar att inte räkna med golvvärmesystem vid elavbrott. Temperaturen i ett golvvärmesystem får inte vara alltför hög, annars kan golvmaterial ta skada. Dessutom är det knappast rimligt att ha en framtemperatur på 80°C i golv som är avsedda att gå på. Hur regleringen av olika golvvärmesystem fungerar vid ett elavbrott har inte studerats inom ramen för detta arbete. Det finns en mängd olika varianter för inkopplingen av golvvärmesystem, bland annat beroende på om byggnaden även har ett radiatorsystem. Generellt kan dock sägas att golvvärmesystem bör skyddas mot övertemperaturer. Man skulle eventuellt kunna möjliggöra för självcirkulation och samtidigt ha en begränsning av framtemperaturer, men detta får överlämnas till fortsatta studier. I byggnader med golvvärme där det finns kritiska verksamheter, det finns till exempel många LSS-boenden med golvvärme i Malmö stad, måste de boende skyddas mot utkyllning på annat sätt, till exempel genom reservkraft eller evakuering.

Slutsatsen är att golvvärme i dagsläget inte kan betraktas som en resurs med avseende på möjligheter till värmeförsörjning genom självcirkulation. På grund av den höga framledningstemperaturen vid självcirkulation bör istället golvvärmesystemen i första hand skyddas mot övervärmning genom självstängande styrventiler.

Lågflödessystem betecknar ett särskilt sätt att injustera och driva ett radiatorsystem. Kort sagt innebär metoden att ett markant lägre sekundärflöde används och att framtemperaturen därmed är högre än i ett konventionellt radiatorsystem. På så sätt anses bland annat den primära returtemperaturen kunna bli lägre i förhållande till vad som gäller för äldre högttemperatursystem [40]. Det är nödvändigt att systemet är överdimensionerat för att metoden ska vara möjlig att använda. Lågflödesinjusteringsmetoden har nått en relativt stor utbredning i Sverige och det är en relevant fråga att fundera om förutsättningarna för självcirkulation påverkas. Styrventilens öppningsgrad, och därmed även fjärrvärmeffödet, är ungefär densamma eftersom värmeförsörjningen är densamma oavsett injusteringsmetod. En bättre avkyllning gör förvisso att en mindre öppningsgrad erfordras men skillnaden är marginell. Det som möjligtvis skulle kunna innebära en skillnad är att lågflödesinjusteringsmetoden

ofta innebär att man kan utesluta injusteringsventiler på stammarna i radiatorsystemet, vars funktion är att balansera flödet mellan stammarna. De uteslutna ventilerna medför ett minskat strömningsmotstånd vilket möjligtvis skulle kunna innebära att lågflödessystemet har bättre förutsättningar för självcirkulation. Som en parentes kan sägas att självcirkulationsdriften är en form av extremt lågflödessystem, det vill säga lågt flöde och hög framtemperatur. Lågflödesinjustering kräver som sagt att radiatorsystemet är överdimensionerat. Alla radiatorsystem är i regel överdimensionerade, i synnerhet äldre system som ibland kan vara 100 procent överdimensionerade [40]. Självcirkulationen gynnas generellt av överdimensionering eftersom strömningsmotståndet då är lägre.

En faktor som kan inverka negativt på självcirkulation är luftens löslighet i vatten, och dess beroende av temperaturen. Om vattnets temperatur stiger från till exempel 40 till 80°C minskar vattnets förmåga att lösa luft mellan 20 och 30 procent beroende på trycket. När temperaturen stiger i radiatorsystemet kan alltså luftbubblor lösa ut ur vattnet. Bubblorna söker sig längst upp i systemet och minskar genomströmningsarean i rören. Efter ett av fältförsöken förekom ett klagomål på att det var kallt i en lägenhet. Detta var flera dagar efter försöket och problemet avhjälpes genom luftning av radiatorerna. Detta kan vara bra att ha i minnet för att underlätta för självcirkulationen.

RESULTATENS GENERALITET

Fältförsöken är utförda i södra Sverige, i huvudsak i Malmö, i relativt mild väderlek. De flesta försök är utförda vid en temperatur mellan 0 och 10°C. Utetemperaturen är i sig mindre viktig för att kunna undersöka hur väl självcirkulationen fungerar i en byggnad. Vid försöken har fjärrvärmenätets temperatur legat gott och väl över 80°C vilket innebär att man principiellt får samma händelseförlopp vid elavbrottsförsöket som vid en lägre utetemperatur. Likväl är det viktigt att studera vilka relativa värmelaster man kan räkna med vid kall väderlek. Syftet med arbetet är ju att söka säkerställa värmeförsörjningen vid ett långvarigt elavbrott under sådana betingelser. Det är även av vikt att kunna generalisera resultaten med avseende på geografiskt läge, det vill säga är våra resultat giltiga i norra Sverige?

Simuleringar

För att undersöka förutsättningarna för självcirkulation vid varierande utomhustemperatur och framledningstemperatur har datorsimuleringar gjorts med hjälp av dynamiska modeller, uppbyggda i programmet Matlab och dess tillhörande toolbox Simulink. Genom att verifiera modellen med fältförsök har den trimmats in för att till så stor del som möjligt överensstämma med resultaten från fältförsöken. En utförligare beskrivning av modellen finns i Bilaga B – Bakgrund till beräkningar. Modellen finns i två utföranden:

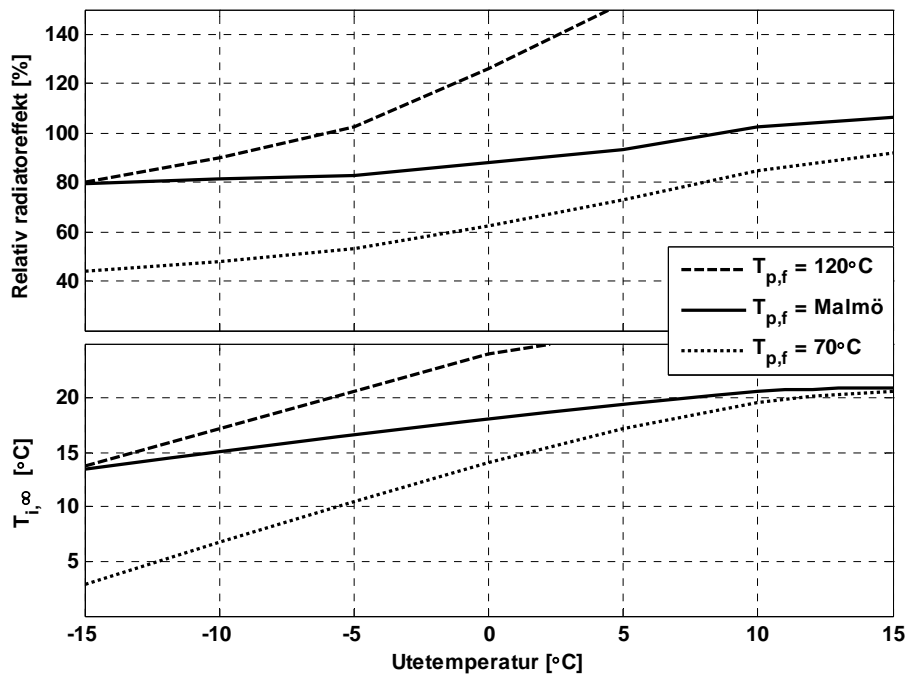
Modell 1: Motsvarande ett flerbostadshus med ett relativt grovt dimensionerat tvårörssystem, 20 lägenheter, tre våningar.

Modell 2: Två flerbostadshus med gemensam fjärrvärmecentral, relativt klen dimensionerat ettrörssystem, 100 lägenheter per hus och sex våningar.

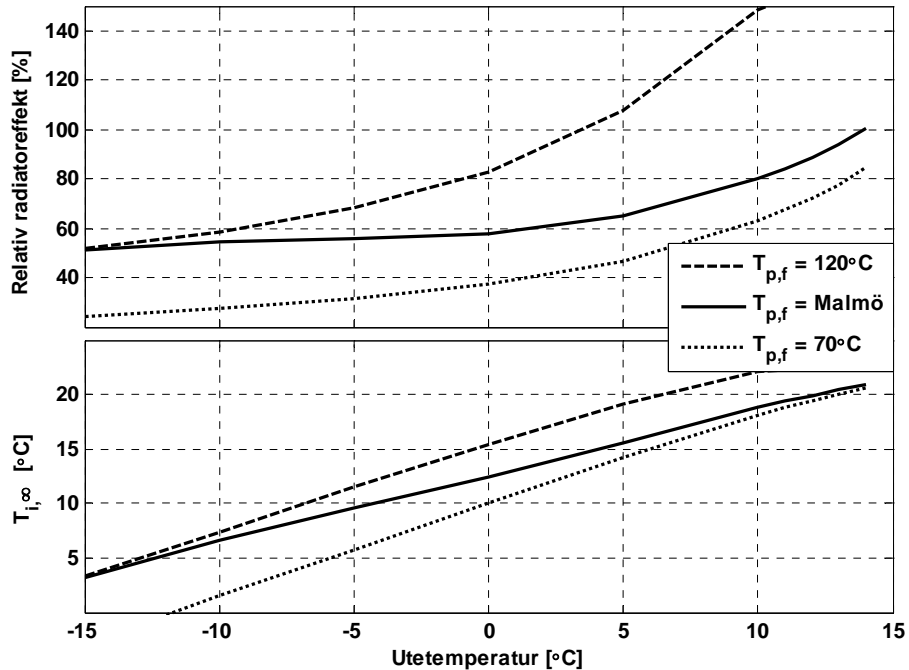
Dessa två modeller bygger på samma grundkomponenter, men representerar två ytterligheter avseende självcirkulation genom att modell nummer 2 har betydligt större tryckfall över radiatorsystemet samt långa horisontella rörsträckningar mellan huskropparna och fjärrvärmecentralen, något som inte är gynnsamt för självcirkulation. Man kan säga att

modell nummer 1 motsvarar försöksobjektet som visades i Figur 7 och att modell nummer 2 motsvarar systemen i Figur 14.

I Figur 26 och Figur 27 visas resultat av simuleringar för modell 1 respektive 2 vid olika utomhustemperaturer. I figurerna visas i de övre diagrammen den radiatorlast som uppnås tack vare själv-cirkulation, relativt den ursprungliga, vid ett elbortfall. I de undre diagrammen visas vilken balanstemperatur ($T_{i,\infty}$) man får i byggnaden, det vill säga den inomhustemperatur som råder efter ett oändligt långt elbortfall. Möjligheten att påverka själv-cirkulationen genom en höjd primär framledningstemperatur ($T_{p,f}$) har också undersökts för varje simulerad utomhustemperatur. Framledningstemperaturen har dels höjts till 120°C (vilket innebär den högsta temperatur som kan tillåtas i de flesta fjärrvärmesystem), dels sänkts till 70°C för jämförelsens skull. (Man kan även tänka sig att en lägre temperatur skulle kunna vara en realitet om endast begränsade produktionsresurser finns tillgängliga vid ett elavbrott.) Som referens används den framledningstemperatur som normalt gäller i Malmös fjärrvärmesät vid respektive utetemperatur.



Figur 26 Simuleringsresultat av relativa radiatorlaster och balanstemperatur, $T_{i,\infty}$, för modell 1.

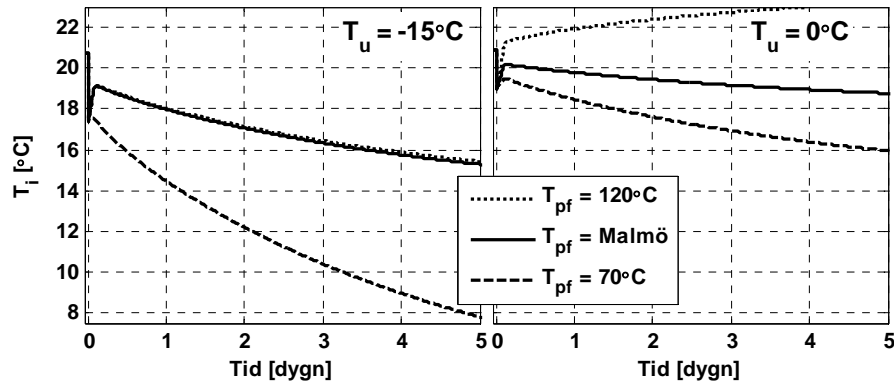


Figur 27 Stor Simuleringsresultat av relativa radiatorlaster och balanstemperatur, $T_{i,\infty}$, för modell 2.

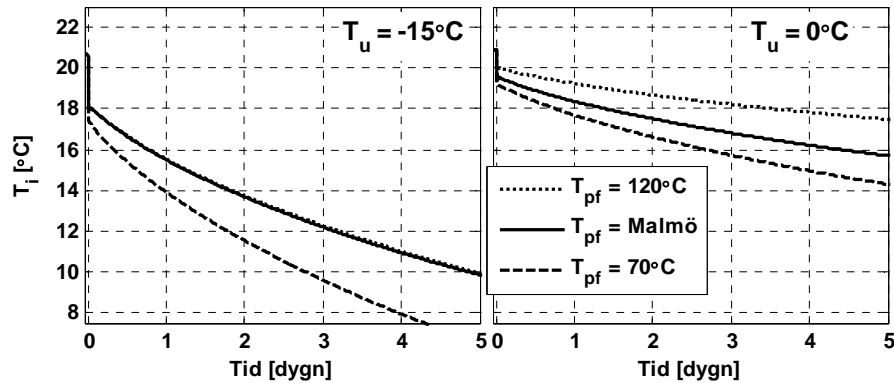
Som synes är modell nummer 1 betydligt mer gynnsam för självциркуlation än modell nummer 2. För byggnaden i modell 1 erhålls alltid drygt 80 procent av effekten efter ett elavbrott vid bibehållen framledningstemperatur. Detta innebär att inomhustemperaturen aldrig kommer att understiga 13°C då framledningstemperaturen följer antagandet för Malmö. Motsvarande inomhustemperatur klaras för modell 2 vid en utetemperatur på ungefär $+2^{\circ}\text{C}$. Då det gäller inverkan av primär framledningstemperatur på inomhustemperaturen innebär en höjning av framledningstemperaturen till 120°C vid en utomhustemperatur på -5°C att inomhustemperaturen höjs med ca 4°C till drygt 20°C för modell 1. Resultatet för inomhustemperaturens dynamiska förlopp kommer att redovisas längre fram.

I Figur 28 och Figur 29 visas inomhustemperaturens dynamiska förlopp. Den genomsnittliga inomhustemperaturen illustrerats för simuleringar med framledningstemperaturen 70°C , normal för Malmö och 120°C för utomhustemperaturerna -15°C , 0°C och 15°C . Med genomsnittlig inomhustemperatur menas här ett medelvärde av inomhustemperaturerna i modellens lägenhetsblock. Man ser tydligt att inomhustemperaturens förändring är ett mer eller mindre långsamt förlopp beroende på utomhustemperaturen och husets termiska tröghet, vilken i sin tur beror på husets isoleringsgrad och massa. För modell nummer 1 tar det över 3 dygn innan inomhustemperaturen understiger 16°C vid en utomhustemperatur på -15°C och normal primär framledningstemperatur. Resultatet av simuleringarna visar att inomhustemperaturen sjunker betydligt snabbare för modell nummer 2 då denna bibehåller betydligt mindre andel av ursprunglig effekt vid elbortfall. Vid en utomhustemperatur på 15°C sjunker inomhustemperaturen till under 16°C på mindre än ett dygn. Figur 28 och Figur 29 visar även vikten av att bibehålla och eller eventuellt höja den primära

framledningstemperaturen i fjärrvärmenätet, då en sänkt framledningstemperatur påverkar inomhustemperaturen kraftigt negativt, särskilt vid låga utomhustemperaturer.



Figur 28 Inomhustemperaturens dynamiska förlopp för olika utomhustemperaturer och primära framledningstemperaturer för modell 1.



Figur 29 Inomhustemperaturens dynamiska förlopp för olika utomhustemperaturer och primära framledningstemperaturer för modell 2.

Avslutningsvis kan man konstatera att simuleringarna kan utgöra ett bra komplement till verkliga försök. Modellerna visar god överensstämmelse med verkligheten. De utförda simuleringarna visar den potential att främja själv-cirkulation som finns i att höja framledningstemperaturen i fjärrvärmenätet.

Fältförsöken vid extrem kyla – beräkning

Förutom simuleringar kan man utifrån fältförsöken försöka uppskatta vilken relativ värmeförlust man skulle kunna uppnå vid låg utetemperatur. Här följer ett försök att extrapolera fältresultaten till en utetemperatur på -15°C vilket ungefär motsvarar dimensionerande utetemperatur, T_{DUT} , för de testade systemen.

Vi utnyttjar det vedertagna sambandet att tryckfallet vid turbulent rörströmning är en funktion av flödet i kvadrat¹ samt att drivtrycket vid själv-cirkulation kan uppskattas med densitetsskillnaden på fram- och returledning vid värmeväxlaren och den uppskattade höjden på systemet:

$$\Delta p_{själv} = (\rho_r - \rho_f) \cdot g \cdot h \quad (2)$$

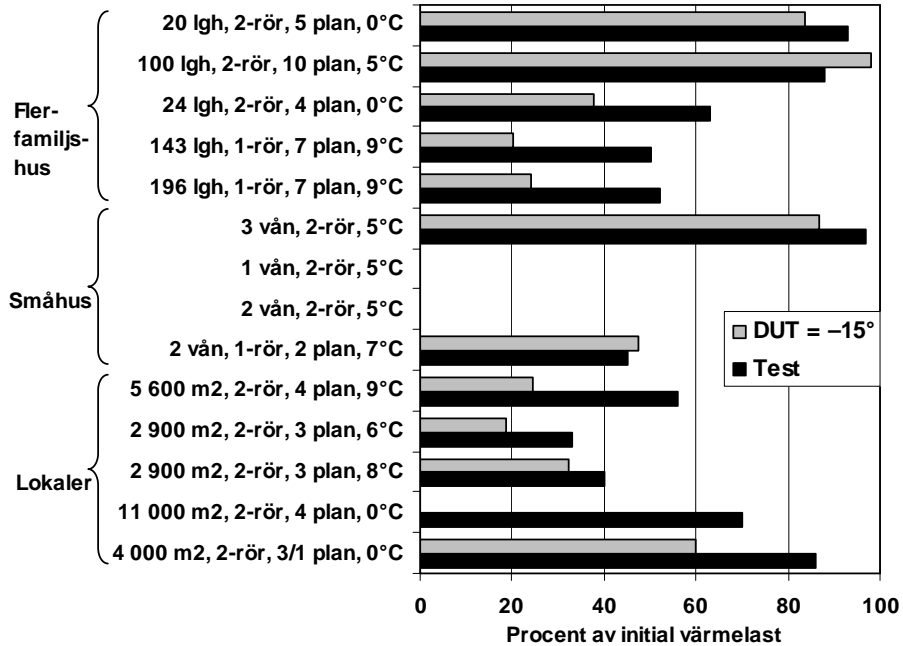
Motståndet i systemet ges av:

$$k = \frac{\Delta p}{\dot{V}^2} \quad (3)$$

Låt oss nu anta att framledningstemperaturen i fjärrvärmenätet är så hög vid denna utetemperatur att man får ut 100 grader i radiatorsystemet. En högre temperatur är knappast önskvärd även om trycket i systemet skulle kunna förhindra förångning. 100 grader är en självklart en mycket hög temperatur, men egentligen inte orimlig då många äldre radiatorsystem är dimensionerade för en maximal temperatur på 80 eller 90 grader. Genom att åter använda ekvation (2) fås ett nytt drivtryck. Genom att sedan lösa (3) för V fås det nya flödet och ett nytt värde på värmeförlusten, Q , kan beräknas.

För att bestämma den relativa värmeförlusten behövs ett värde på den absoluta värmeförlusten vid -15°C . Det hade varit mycket arbetskrävande att ta fram så kallade energisignaturer för varje byggnad, men man kan göra ett förenklat antagande. Q är linjärt avtagande vid ökande utetemperatur och kan antas vara 0 vid 17 grader. Med två driftspunkter kan man så bestämma Q vid -15°C och därefter den relativa lasten. Resultatet av den här extrapoleringen har, tillsammans med mätresultaten som visades i Figur 10, lagts in i Figur 30. De grå staplarna har tillkommit och visar alltså den uppskattade relativa värmeförlusten vid -15°C .

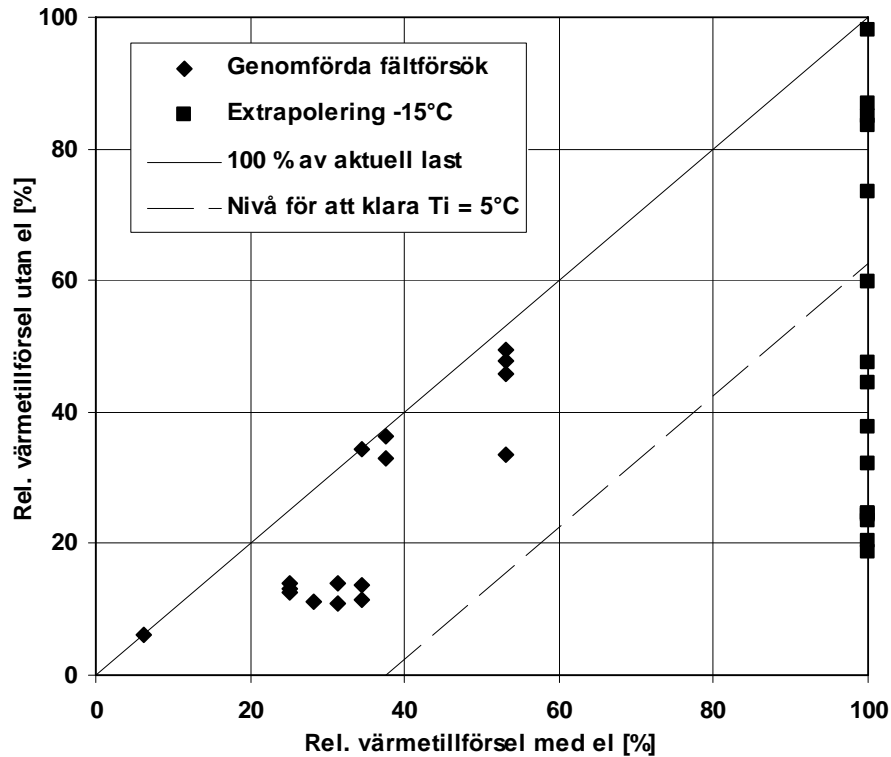
¹ Vid turbulent rörströmning är tryckfallet en funktion av flödet i kvadrat. Vid laminär strömning råder ett linjärt samband. Gränsen för turbulent strömning går vid ungefär ett Reynolds tal på 2300. För att det ska bli aktuellt med laminärt flöde måste man ner under 0,01 m/s i strömningshastighet vilket är i storleksordningen en hundradel av vad som dimensioneras för. Inte ens vid själv-cirkulation är det därför troligt att man får laminärt flöde i någon betydande utsträckning. Se vidare i exempelvis [24] eller [56].



Figur 30 Sammanställning av genomförda försök med själv-cirkulation inklusive extrapolering till -15°C .

Det går att dra några slutsatser från försöket att extrapolera resultaten. Värmetillförseln ökar då den primära framledningstemperaturen höjs, vilket även kunde ses i simuleringarna. Emellertid minskar den relativa värmetillförseln i de flesta fall, mest i de system som vid försöket gav sämre resultat och lite mindre i de system som fungerade bättre.

Figur 31 redovisar resultaten på ett något annorlunda vis. Fältmätningarna redovisas med den värmetillförsel som uppnåddes vid försöket i förhållande till objektets maximala effektbehov på y-axeln. På x-axeln visas den aktuella värmetillförseln i förhållande till objektets maximala effektbehov innan försöket inleddes. Diagonalt i diagrammet har en heldragen hjälplinje ritats in. Denna anger 100 procent tillförd effekt i varje driftspunkt. Även de extrapolerade värdena som redovisades i förra figuren finns med i denna figur. De hamnar då på 100 procent av relativ värmetillförsel med el. Ytterligare en hjälplinje (streckad linje) indikerar den värmetillförsel som krävs för att klara en inomhustemperatur på 5 grader.



Figur 31 Sammanställning av genomförda försök med själv-cirkulation inklusive extrapolering till maxlast. Den heldragna linjen indikerar gränsen för 100 procent last i varje driftssituation. Den streckade linjen visar erforderlig effekt för att uppnå en inomhustemperatur på 5 grader.

Man ser att samtliga testade objekt klarade 5-gradersnivån vid fälttesten. Vid extrapolering klarar ungefär hälften av objekten 5-gradersnivån. Här bör man dock ha några saker i åtanke:

Två objekt hade en felvänd värmeväxlare vilket gav en generellt låg värmeförsel till byggnaden. Med en ”normal” värmeväxlarkonfiguration” hade värmeförseln varit avsevärt större.

I övriga objekt som fick låg värmeförsel fördelades värmen ojämnt, d v s vissa delar fick mer eller mindre normal värmeförsel medan andra delar blev utan (i objekt med hög värmeförsel fördelades värmen relativt jämnt). I en krissituation skulle en omfördelning av brukarna i dessa byggnader sannolikt räcka till för att undvika en evakuering.

Geografiskt läge

Hittills har detta arbete fokuserat på Malmö och de byggnadstyper och det klimat som råder i den regionen. Det är dock angeläget att visa på resultatens geografiska generalitet. De flesta fältförsöken har utförts vid drygt 0 grader, vilket ungefär motsvarar medeltemperaturen i Malmö i januari på strax under 0 grader. I exempelvis Luleå är medeltemperaturen i januari -10 grader. I beräkningarna har 15 minusgrader använts som extremvärde för Malmö, medan motsvarande temperatur för Luleå är i storleksordningen 30 minusgrader. Se mer i *Svensk Standard, Dimensionerande utetemperatur – Byggnaders effektbehov*, [54].

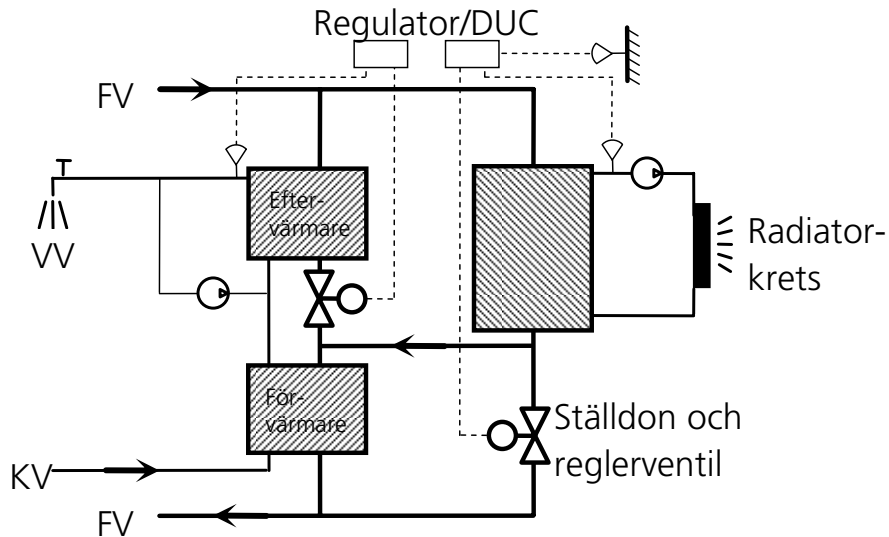
Som väl är ökar inte värmebehovet lika drastiskt som utetemperaturen sjunker när man förflyttar sig norrut. Ett vanligt begrepp för att beskriva klimatet i olika regioner med avseende på uppvärmningsbehov är graddagar¹. Temperaturzon 1-2 har 46 procent fler graddagar än temperaturzon 4. Om man däremot jämför fjärrvärmeanvändningen i flerbostadshus så var den i medeltal endast 11 procent högre i temperaturzon 1-2 än i temperaturzon 4 (normalårskorrigerat medelvärde 2003-2006), enligt SCB, [51]. Eftersom byggnadsisolering, radiator- och fjärrvärmesystem dimensioneras för ett kallare klimat blir energianvändningen endast marginellt högre. Temperaturnivåerna i fjärrvärme- och radiatorsystemen är av samma storleksordning runtom i landet.

TAPPVARMVATTEN

Tappvarmvattenkretsen har tidigare berörts under Vad händer med värmen vid ett elavbrott? – Tappvarmvatten. Under den här rubriken kommer därför bara ett tillägg beträffande självcirkulation gällande vissa typer av fjärrvärmecentraler.

Väldigt många fjärrvärmecentraler i Sverige, i synnerhet i flerbostadshus, har en så kallad 2-stegskoppling. Det innebär att man använder det fjärrvärmeflöde som passerat radiatorvärmväxlaren för att förvärma det inkommande kallvattnet till tappvarmvattenkretsen, Figur 32. Tappvarmvattenväxlaren är här uppdelad i två delar, för- respektive eftervärmare. Returflödet från radiatorväxlaren blandas med returflödet från eftervärmaren och leds in i förvärmaren. Syftet med denna kopplingsprincip är att förbättra avkylningen av fjärrvärmeflödet, det vill säga att få ut så mycket energi som möjligt ur varje volymenhet fjärrvärmevatten.

¹ ”Beräknas av SMHI som skillnaden mellan +17C och aktuell dygnsmedeltemp (td) summerad över nov-mars,, de dygn i oktober då td<+13C, de dygn i april och sept då td<+12C, de dygn i augusti då td<+11C, de dygn i maj-juli då td<10C.” [51]



Figur 32 Översiktlig bild av en 2-stegskopplad fjärrvärmecentral.

Vid ett elavbrott kommer differenstrycket i kallvattennätet inte att omedelbart försvinna. Vattenreservoarer i vattentorn och reservkraft till pumpar innebär att differenstrycket kommer att kunna upprätthållas i åtskilliga timmar, eller dagar på vissa platser. Dricksvatten är självfallet en viktig samhällsfunktion som måste säkerställas i en krissituation.

Så länge det finns ett tillräckligt differenstryck i kallvattennätet och en brukare öppnar en varmvattenkran, kommer kallvatten att passera tappvarmvattenväxlaren och fortsätta ut till tappstället. Om vi antar att styrventilen till tappvarmvattenkretsen är självstängande, så kommer inget fjärrvärmeflöde att passera eftervärmaren. Däremot kommer fjärrvärmeflödet som passerat radiatorväxlaren att fortsätta ta vägen genom förvärmaren. Eftersom detta flöde håller en högre temperatur än det inkommande kallvattnet, kommer det att värma kallvattnet. Vid de genomförda fältförsöken noterades returtemperaturer från radiatorkretsen mellan 30 och 70 grader (De högsta returtemperaturerna orsakades främst av felvända värmeväxlare). I medeltal var returtemperaturen ungefär 45 grader. Beroende på hur stort tappflödet är kommer det att värmas mot denna temperatur, ett måttligt flöde kommer att kunna värmas uppemot 45 grader.

Även om man använder självstängande styrventiler i tappvarmvattenkretsen kommer alltså tappvarmvattnet att kunna värmas i viss utsträckning i 2-stegskopplade fjärrvärmecentraler. Även om varmvattnet värms okontrollerat är risken minimal att det blir så varmt att det medför en skällningrisk eftersom det endast värms mot returflödet från radiatorväxlaren.

En annan positiv effekt av 2-stegskopplingen är den ytterligare avkylning av fjärrvärmeflödet som fås. Eftersom returtemperaturen generellt blir högre vid självcirkulation är detta positivt samtidigt som värmeunderlaget ökar vilket är gynnsamt med avseende på ö-drift med kraftvärme.

AVKYLNING AV FJÄRRVÄRMENÄT

Som nämndes inledningsvis är det väsentligt att det finns en rimlig avkylning av vattnet i fjärrvärmenätet för att driften av nätet ska kunna fungera. Särskilt viktigt är detta om man vill driva ett kraftvärmeverk som har fjärrvärmenätet som sin huvudsakliga värmesänka (kylning). Vi har sett möjligheterna till värmeförsörjning genom självcirkulation men även om man bortser från denna möjlighet så är det nödvändigt att fjärrvärmenätet kan fungera så att kunder med reservkraftsaggregat, exempelvis sjukhus, kan få värme från fjärrvärmenätet.

Flera faktorer hänger ihop i händelse av ett elavbrott: Har jag reservkraft till min fjärrvärmecentral så måste ändå fjärrvärmenätet fungera för att jag ska få värme. Vill man upprätta ö-drift genom att producera elkraft i ett kraftvärmeverk måste fjärrvärmenätet fungera. Vill man kunna förse så många människor som möjligt med värme genom självcirkulation så måste fjärrvärmenätet fungera. Det sistnämnda är rimligtvis den avgörande faktorn som innebär att avkylningen i fjärrvärmenätet blir så pass god att fjärrvärmenätet kan fungera vid ett längre elavbrott.

Med avseende på frågan om tillräckligt värmeunderlag för att driva kraftvärmeverk så bör man även ha i åtanke att en del värme avgår som värmeförluster i nätet. Förlusterna blir dessutom större eftersom cirkulationsflödet i nätet sannolikt kommer att vara lägre än normalt. En inte obetydlig mängd värme kan också laddas upp i nätet – energi som sannolikt är till nytta efter ett elavbrott då mycket värme efterfrågas, mer om detta finns att läsa i *Sårbarhet hos fjärrvärmeförsörjning med tonvikt på känslighet för elavbrott* [9]. Som nämnts tidigare kan även viss värmeöverföring till tappvarmvattensystem ske i 2-stegskopplade fjärrvärmecentraler, även om styrventilen för tappvarmvatten är stängd.

Även om det sannolikt kommer att finnas en betydande värmelast i fjärrvärmenäten under ett elavbrott, så kommer avkylningen av fjärrvärmevattnet att vara sämre än normalt, det vill säga returtemperaturen kommer att vara förhöjd. Alla styrventiler som stannar i sina befintliga lägen i sekundära kretsar som inte har någon, eller mycket liten, avkylning bidrar till en högre returtemperatur. Detta gäller tappvarmvatten- och separata ventilationskretsar. Felvända värmeväxlare bidrar också till att avkylningen blir lägre under ett elavbrott.

VAD KAN JAG GÖRA SJÄLV?

Det här kapitlet avser att ge konkret information och rekommendationer till läsaren på flera olika plan, hur man kan agera för att förbättra beredskapen mot ett långvarigt värmebortfall i samband med ett elavbrott. Först diskuteras hur man själv kan genomföra praktiska försök. Därefter kommer en vägledning till hur man kan försöka uppskatta förmågan för en byggnad att få självcirkulation i radiatorsystemet, utifrån en bedömning av systemets egenskaper. Till sist kommer rekommendationer att ges till alla aktörer som berörs av problematiken kring uppvärmning.

PRAKTISKA FÖRSÖK

I Bilaga A – Praktiska försök med självcirkulation finns ett avsnitt som heter Genomförande. Där beskrivs detaljerat den metodik som har tillämpats vid fältförsöken i samband med arbetet i detta projekt. Förhoppningsvis kan beskrivningen vara till hjälp för den som vill göra en noggrann studie av en specifik byggnad. Emellertid kräver detta förfarande en del resurser i form av mätutrustning (temperaturgivare, datalogger, dator), personal och tid. Vill man snabbt skaffa sig en uppfattning om vad som händer i en viss byggnad vid ett elavbrott kan man med fördel nöja sig med ett enklare försök. I avsnittet Förenklat förfarande i bilagan finns en manual som i punktform beskriver hur man på ett par timmar kan dokumentera ett försök med papper och penna.

GROV UPPSKATTNING MED HJÄLP AV TABELL

Om man inte har möjlighet att gå ut och testa olika byggnader, vilket blir tidsödande i längden, har ett försök gjorts att ta fram en manual för att kunna uppskatta förutsättningarna för självcirkulation i en godtycklig byggnad, utifrån ett antal egenskaper hos byggnaden. Den här manualen, som är utformad som en matris finns i Bilaga C – Bedömning av möjligheter till självcirkulation. Tanken är att man går igenom ett antal punkter som beskriver byggnaden och radiatorsystemet, såsom byggnadens storlek och utformning, typ av radiatorsystem etc. Baserat på de praktiska försöken kan man schablonmässigt uppskatta hur mycket förmåga till självcirkulation som går förlorad på grund av olika faktorer. Den här metoden kan självfallet aldrig med säkerhet säga hur en specifik byggnad kommer att fungera, men kan utgöra ett värdefullt stöd om man exempelvis vill klassificera byggnadsbeståndet på en ort eller i olika stadsdelar.

INFORMATION TILL BERÖRDA PARTER

I detta avsnitt har information och rekommendationer sammanställts som kan vara till hjälp för olika aktörer som berörs av frågor angående trygg värmeförsörjning. Rekommendationerna är både av förebyggande karaktär och rådande angående vad som kan göras om ett elavbrott inträffar för att underlätta för god självcirkulation.

Fjärrvärmebolag

För att fjärrvärme ska kunna levereras under ett elavbrott är det en absolut nödvändighet att fjärrvärmenätet kan drivas vidare. Reservkraft fordras alltså dels för att värmeproduktionen ska kunna upprätthållas och dels för att värmedistributionen, det vill säga cirkulationspumparna i nätet ska kunna drivas vidare.

Då intresset för säker energiförsörjning ökar och möjligheter till ö-drift undersöks på olika orter, kan man argumentera för att alla fjärrvärmenät borde ha en kraftvärmeanläggning. Förutom andra fördelar, såsom miljövinster, innebär det att man kraftigt förbättrar möjligheterna att förse känsliga verksamheter med både elektricitet och värme. Som detta arbete visat finns även goda möjligheter för fjärrvärmekunder som står utan el att kunna ta emot fjärrvärme.

Mer konkret kan man argumentera för att fjärrvärmelieferantören bör höja framledningstemperaturen i fjärrvärmenätet under ett elavbrott. På så sätt kan man få en högre framledningstemperatur i radiatorsystemet och självcirkulationen stimuleras. Det finns dock invändningar mot en höjd nättemperatur. I en osäker elsituation kan det vara olämpligt att höja framledningstemperaturen. Vid mycket kall väderlek är det heller inte säkert att det är möjligt att höja temperaturen ytterligare.

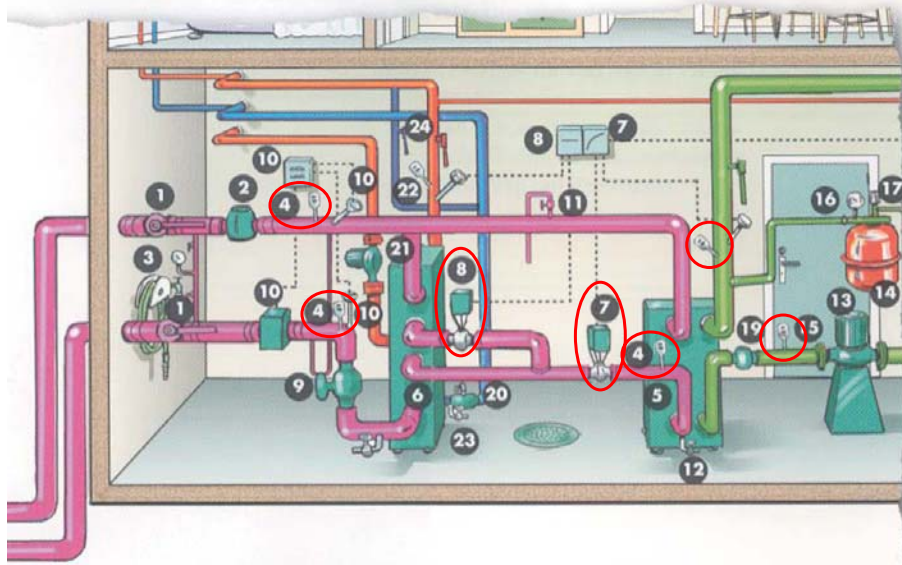
Myndigheter

För myndigheter som bedriver arbete för att öka beredskapen och minska sårbarheten i samhället i händelse av elavbrott utgör det här arbetet ett viktigt underlag. Genom att kartlägga geografiska områden och dess bebyggelse med hjälp av praktiska försök eller genom att använda matrisen i Bilaga C – Bedömning av möjligheter till självcirkulation kan man skaffa sig en god uppfattning om känsligheten för utkylning av byggnader i olika områden och byggnadskategorier. Man kan se vilka kategorier som klarar sig bättre och var det är nödvändigt med särskilda insatser, till exempel evakuering eller reservaggregat.

Fastighetsägare

Fastighetsägare får genom det här arbetet en möjlighet att se över sitt bestånd och bedöma möjligheterna att klara värmeförsörjningen vid ett längre elavbrott. Praktiska försök eller bedömning av vissa byggnadskategorier med hjälp av resultaten i rapporten eller genom att använda matrisen Bilaga C – Bedömning av möjligheter till självcirkulation ger en överblick över situation i beståndet. Eventuellt måste ytterligare åtgärder vidtas för vissa delar av beståndet för att säkra värmeförsörjningen.

Den personal som sköter driften av fastigheterna har en mycket viktig roll om ett elavbrott skulle inträffa. Alla fjärrvärmecentraler måste besökas för att undersöka om självcirkulation har kommit igång i respektive system. Vissa åtgärder kan behöva vidtas för att underlätta för cirkulationen. Figur 33 nedan är hämtad från Svensk Fjärrvärmes handbok *Din fjärrvärmecentral – En handbok för dig som sköter värmen i huset* [52]. Den mest centrala komponenten är styrventilen för radiatorsystemet (alternativt gemensam värmekrets för radiator, ventilation etc.) – indikerad med 7 i bilden och inringad i rött.



Figur 33 Exempel på fjärrvärmecentral. Styrventiler och instickstermometrar har ringats in. Med tillstånd hämtad från [52].

Ställdonet kan vara av stängande typ och ventilen måste då öppnas manuellt. Manual för ställdonet finns normalt i fjärrvärmerummet. För att se om ventilen är stängd och att rätt öppningsgrad kan åstadkommas kan man ta hjälp av de termometrar som finns monterade på samtliga rör. Leta upp den utgående ledningen från radiatorväxlaren vars termometer visar framledningstemperaturen till värmesystemet. Jämför denna temperatur med temperaturen på det inkommande fjärrvärmevattnet. Skillnaden bör inte överstiga 20 grader, det vill säga om fjärrvärmeframledningen håller till exempel 90 grader bör den sekundära framledningstemperaturen vara åtminstone 70 grader. Skulle det vara så att styrventilen har stängts är temperaturen dock sannolikt betydligt lägre. Att öppna styrventilen kräver viss varsamhet. Ventiler är ofta generöst dimensionerade och om den öppnas fullt blir fjärrvärmeflödet mycket stort. Eftersom den mängd värme som kan överföras vid själv-cirkulation är begränsad leder ett onödigt stort flöde till att avkyllningen blir mycket liten, eller med andra ord att returtemperaturen blir hög. En annan nackdel om ventilen står ventilen fullt öppen är att den ”stjäl” differensstryck. Många fullt öppna ventiler kan orsaka att andra kunder får för lågt differensstryck och därmed bristfälligt fjärrvärmeflöde.

Om den sekundära framledningstemperaturen är för låg ska alltså styrventilen öppnas. Då detta görs måste man öppna ventilen försiktigt och hålla koll på temperaturen. En rekommendation är att försöka öppna lite grann och sedan vänta en stund (helst 30 minuter eller mer) och kontrollera att den sekundära framledningstemperaturen är hög men att fjärrvärmereturen samtidigt inte är för hög. Om det sistnämnda är fallet, bör öppningsgraden minskas. Skillnaden mellan den inkommande och den utgående temperaturen på fjärrvärmevattnet bör inte understiga 30 grader och den utgående fjärrvärmemetemperaturen bör heller inte vara högre än 50 grader.

Observera att vi så här långt uppehållit oss vid styrventilen för värmesystemet. Beträffande tappvarmvattensystemet är situationen annorlunda. Dessa styrventiler är ofta utrustade med en självstängande ventil och denna ska i så fall inte öppnas manuellt. Skulle ventilen inte vara

av självstängande typ finns det risk att tappvarmvattentemperaturen är mycket hög (särskilt om den hade en stor öppningsgrad då elavbrottet inföll). Det rekommenderas då att man stänger ventilen för att undvika risken för skällningsskador.

Finns det en separat ventilationskrets (med egen värmeväxlare) bör styrventilen till denna stängas om den inte är självstängande.

Det är möjligt att vidta ytterligare åtgärder för att främja självcirkulationen då ett elavbrott väl har inträffat. Genom att gå runt i källarplanet i en byggnad kan man känna sig fram hur självcirkulationen spridits i huset. På varje plats där en stamledning avlänkas kan man känna på röret. Rören är isolerade men just där stammen avlänkas kan man komma åt att känna på röret. Har självcirkulationen nått en stam kommer röret att upplevas som varmt. Är det inte cirkulation i stammen kommer den däremot att kännas kall. I framför allt större byggnader är det mycket möjligt att så gott som alla stammar i större delen av byggnaden är varma fram till en viss gräns varefter stammarna är kalla. I denna situation kan man stänga av några spridda stammar i det varma området genom att stänga avstängningsventilen på stammen. Detta medför att differenstrycket räcker längre ut i systemet, det vill säga att flödet flyttar till kalla stammar, och på så sätt fås en jämnare värmefördelning i byggnaden. När elen har återkommit måste förstas samtliga stammar öppnas igen.

Ytterligare ett område som kan påverkas är så kallade hydrauliska kortslutningar, det vill säga komponenter som släpper igenom flöde utan att det får någon kylning och därigenom stjälar differenstryck. Ett exempel på detta är ventilationsaggregat vid ett elavbrott. Som tidigare beskrivits kommer dessa att få inga, eller mycket små, luftflöden. Genom att stänga avstängningsventiler till ventilationsaggregat underlättar man för självcirkulationen i radiatorsystemen. Även här är det förstas viktigt att återställa efter elavbrottet.

Vid de höga vattentemperaturer som råder vid självcirkulation minskar vattnets förmåga att lösa luft och man kan få luftbubblor i systemet som kan försämra cirkulationen. Det kan därför vara en god idé att lufta radiatorer då det finns risk att luft samlas och hindrar cirkulationen.

Det är viktigt att kontrollera den utgående temperaturen från tappvarmvattenvärmeväxlaren, helst under en längre stund då den kan variera beroende på om det sker några tappningar. Överstiger temperaturen 65°C har styrventilen för stor öppningsgrad och bör stängas. Som tidigare nämnts innebär 2-stegskoppling i fjärrvärmecentraler att viss beredning av tappvarmvatten kan ske genom returflödet från radiatorvärmeväxlaren.

Tillverkare av fjärrvärmecentraler och VVS-komponenter

Vi har sett exempel på hur konstruktionen av en del komponenter förhindrar eller begränsar självcirkulation. Det mest uppenbara är styrventiler som stänger vid elavbrott. Det finns inga uppgifter på att styrventiler utrustade med lägesåterföring förekommer i uppvärmningskretsar. Däremot förekommer så kallade elektromagnetiska ställdon som har en konstruktion som gör att de oundvikligen stänger vid spänningsbortfall. De skulle kunna utformas så att de öppnar ventilen fullt ut istället men det är inte heller ett lämpligt alternativ. Dessa ställdon bör alltså undvikas om man vill möjliggöra för självcirkulation.

En annan kraftig begränsning för självcirkulation är vad vi valt att kalla felvända värmeväxlare, det vill säga värmeväxlare där utgående sekundärflöde lämnar värmeväxlaren i botten. Detta medför att självcirkulationsflödet vänder och värmeväxlaren fungerar som en medströmsvärmeväxlare vilket kraftigt försämrar värmetillförseln.

Shuntkopplingar har i detta arbete pekats ut som en begränsande faktor för självcirkulation. Radiatorsystem anslutna via shuntkopplingar kan normalt få självcirkulation men inblandning av returflöde i shunten gör att framledningstemperaturen sänks och därmed blir självcirkulationen lägre. Vill man ha shuntkopplingar utan att försämma förutsättningarna för självcirkulation bör de förses med avstängningsventil i anslutning till backventilen så att inblandning kan förhindras.

Golvvärmesystem är på stark frammarsch och installeras i många nybyggnationer. Dessa system har inte studerats i detalj men kan dock i dagsläget inte betraktas som en resurs med avseende på möjligheter till värmeförsörjning genom självcirkulation. Eftersom självcirkulation i regel innebär en mycket hög framledningstemperatur bör istället golvvärmesystemen i första hand skyddas mot övervärmning genom självstängande styrventiler.

Vid nybyggnation eller renovering

Som nämndes i föregående stycke är det golvvärmesystem inte alls samma möjligheter till självcirkulation. Detta bör tas i beaktande vid en nybyggnation, om byggnaden kommer att ha känslig verksamhet måste värmeförsörjningen vid ett elavbrott tryggas på annat sätt.

I övrigt bör de hinder som tidigare tagits upp undvikas. Det gäller exempelvis utformningen av byggnad och värmesystem. Eftersom stora radiatorsystem har sämre förutsättningar för självcirkulation bör inte flera byggnader anslutas med ett gemensamt system, utan hellre ha egna fjärrvärmecentraler och radiatorsystem.

För kunna få så bra självcirkulation som möjligt bör man om möjligt välja att installera separat radiator- och ventilationskrets istället för att ansluta dem till en gemensam oshuntad värmekrets via shuntkopplingar. Radiatorkretsen bör då ha en styrventil som stannar i sitt läge medan ventilationskretsen har en självstängande styrventil.

Vid en nybyggnation skulle det vara en god idé att genomföra ett självcirkulationstest i samband med slutbesiktningen.

Brukare

I regeringens proposition *Samverkan vid kris – för ett säkrare samhälle*, [43], påpekas att: ”Den enskilde behöver få stöd i form av information om vilka egna säkerhetsåtgärder som kan vidtas för att kunna klara en krissituation, t.ex. långvariga avbrott i el-, vatten- och värmeförsörjning.”

Möjligheterna för en enskild hyresgäst eller nyttjare av en byggnad att påverka självcirkulationen vid ett elavbrott är små. Det finns dock en del åtgärder som kan rekommenderas. Till exempel kan man ta reda på i vilka rum det finns värme: Vilka radiatorer är varma? I många fall kan det vara så att en hel lägenhet, eller vissa rum, får mycket varma radiatorer, till och med så varma att inomhustemperaturen blir för hög. I så

fall kan man med fördel stänga av en eller flera radiatorer. Ju fler radiatorer man kan stänga av desto bättre, på så sätt räcker värmen till fler delar av byggnaden. Är det tvärtom kallt i lägenheten får man ta reda på om det är någon radiator som är varm. I så fall får man försöka uppehålla sig i det rummet och hålla övriga dörrar stängda. Radiatorerna kan bli mycket varma vid självcirkulation vilket innebär en större risk att få luftbubblor i systemet som kan försämra cirkulationen. Det kan därför vara en god idé att lufta radiatorer.

Man kan också försöka begränsa utkylningen av bostaden genom att täppa till ventilationsdon. Tänk dock på att luftkvaliteten kan bli dålig, särskilt om man använder stearinljus, och att man kan behöva vädra!

SLUTSATSER

I studien har det kunnat konstateras att det är möjligt att leverera värme vid ett elavbrott till en mycket stor del av byggnadsbeståndet genom självcirkulation i fjärrvärmeanslutna radiatorsystem. Självcirkulation uppstår då det finns en tillräckligt stor temperaturskillnad mellan fram- och returledning i radiatorsystemet. Reglering och cirkulationspump i radiatorsystemen slutar att fungera men de allra flesta styrventiler stannar i sina lägen och fjärrvärmevatten kan därmed fortsätta att passera genom radiatorsystemens värmeväxlare och självcirkulation kan då uppstå.

En förutsättning för att självcirkulation i enskilda byggnader ska kunna fungera är således att fjärrvärmenätet kan fungera vid ett elavbrott. Fjärrvärmeleverantören måste alltså ha reservkraft för att kunna upprätthålla produktion och distribution av fjärrvärme, något som inte alltid är fallet. Våra studier visar att det finns all anledning att tillgodose detta. Dessutom finns kunder som har egna reservaggregat, till exempel sjukhus, som är beroende av att fjärrvärmenätet fungerar.

För att kunna upprätta ö-drift vid ett elavbrott är det i många fall en förutsättning att det finns förbrukning av fjärrvärme i nätet. Det är inte ovanligt att kraftvärmeanläggningar är beroende av fjärrvärmenätet för kylning till elproduktionen. Man kan utifrån resultaten även argumentera för att alla fjärrvärmenät borde ha kraftvärme i syfte att skapa en tryggare energiförsörjning.

Resultaten visar att de allra flesta byggnader kan få självcirkulation vid ett elavbrott motsvarande 40-80 procent av uppvärmningseffekten. Tappvarmvattensystem omfattas primärt inte av detta även om viss tappvarmvattenproduktion kan vara möjlig. Självcirkulationen fungerar bättre ju högre utetemperaturen är. Dock kan de flesta byggnader, eventuellt efter vissa modifieringar, få minst 50 procent av uppvärmningseffekten vid en mycket låg utetemperatur, vilket innebär att man normalt klarar sig i flera dygn innan en eventuell evakuering blir nödvändig.

De genomförda studierna har möjliggjort att en rad rekommendationer har kunnat sammanställas. Rekommendationerna avser att öka möjligheterna till självcirkulation i olika system och riktar sig till alla berörda parter, det vill säga från myndigheter och fjärrvärmeföretag till tillverkare, fastighetsägare, driftspersonal och boende, och innefattar både förberedande åtgärder och sådana åtgärder som kan vidtas när ett elavbrott väl har inträffat.

Avslutningsvis kan man konstatera att det bör finnas ett värde i form av att de presenterade resultaten är ett försäljningsargument för fjärrvärme och att samhällets kostnader för exempelvis reservaggregat och eventuella evakueringar kan minskas.

REFERENSER

- [1] Abel, E. – Elmroth, A., *Byggnaden som system*, Formas, Stockholm, 2006, ISBN 91-540-5974-7.
- [2] Boverket, *Boverkets författningssamling, BFS 2008:6, BBR 15*, www.boverket.se.
- [3] Carlson, A. – Berry, J., *Experiences with Combined Heat and Power during the August 14, 2003 Northeast Blackout*, Power-Gen 2004 Conference, Orlando, USA.
- [4] Dahlroth, B., *Säkrare Värmeförsörjning! Tillstånd, Förbättringsmöjligheter, Beredskapsåtgärder*, Värmek, 2007.
- [5] *Energideklarering av bostadsbyggnader – Metoder för besiktning och beräkning*, version 2, ATON Teknikkonsult AB, hämtad från www.energiradgivarna.com.
- [6] Energimyndigheten, *Värmeförsörjning vid långvariga elavbrott*, Rapport EB 1:1998, 1998, ISBN 91-89184-00-9.
- [7] Energimyndigheten, *Kommunernas värmeberedskap. Förberedelser och lösningar för värmeförsörjning i kris*, Rapport ET 2001:38, 2001.
- [8] Energimyndigheten, *En leveranssäker elöverföring*, Rapport ER 2005:19, 2005.
- [9] Energimyndigheten, *Sårbarhet hos fjärrvärmeförsörjning med tonvikt på känslighet för elavbrott*, Rapport ER 2005:31, 2005.
- [10] Energimyndigheten, *Stormen Gudrun och uppvärmningen. Erfarenheter från elavbrott med inriktning på uppvärmning av byggnader*, Rapport ER 2005:33, 2005.
- [11] Energimyndigheten, *Kunskapsläget inom småskalig kraftvärmeproduktion och eloberoende värmesystem – Insatser för ökad försörjningstrygghet*, Rapport ER 2006:29, 2006.
- [12] Energimyndigheten, *Hur trygg är vår energiförsörjning? En översiktlig analys av hot, risker och sårbarheter inom energisektorn år 2006*, Rapport ER 2007:06, 2007.
- [13] Energimyndigheten, *Energimyndighetens ansvar för trygg energiförsörjning*, Dnr 60-07-1248, 2007.
- [14] Energimyndigheten, *Fjärrvärme vid ö-drift*, Rapport ER 2007:13, 2007.
- [15] Energimyndigheten, *Åtgärder för gamla och sjuka vid omfattande el- eller värmeavbrott*, Rapport ET 2007:45, 2007.
- [16] Energimyndigheten, *Helhetssyn för Elförsörjningens säkerhet och beredskap (HEL-projektet)*, hämtad från:
[http://www.energimyndigheten.se/WEB/STEMFe01e.nsf/V_Media00/C12570D10037720FC12571250028BA41/\\$file/helslut.pdf](http://www.energimyndigheten.se/WEB/STEMFe01e.nsf/V_Media00/C12570D10037720FC12571250028BA41/$file/helslut.pdf), 2007-10-03

- [17] Energimyndigheten, *Energianvändning i vårdlokaler – Förbättrad statistik för lokaler STIL 2*, ER 2008:09, 2008.
- [18] Energimyndigheten, *Referenspärm med informationsmaterial*.
- [19] Fischer, G. – Molin, S., *Isstormen i Kanada*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, Användarrapport FOI-R--0103--SE, 2001
- [20] Frost, C – Barck-Holst, S – Ånäs, P – Lövkvist Andersen, A-L, *Acceptabla elavbrott? Fyra strategier för säker elförsörjning*. Totalförsvarets Forskningsinstitut, 2004.
- [21] Gumméus, P, *Analys av konventionella abonnentcentraler i fjärrvärmesystem*, doktorsavhandling, Institutionen för Energiteknik, Chalmers tekniska högskola, 1989.
- [22] Haines, R. – Hittle, D., *Control systems for heating ventilation and air conditioning*, sjätte upplagan, Kluwer Academic Publishers, USA, 2003, ISBN 1-4020-7417-4.
- [23] Hjorthol, E. M., *Optimization of design values in district heating substations by system simulation*, doktorsavhandling, Institutt for Varme-, ventilasjons- og sanitaerteknikk, Norges tekniske høgskole, Trondheim, Norge, 1990.
- [24] Häggbom, S. – Nylund, P-O., *Värt att veta om vattenburen värme*, Rapport R42:1989, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm, 1989, ISBN 91-540-5048-0.
- [25] Johansson, P-O. – Ljunggren, P., Wollerstrand, J., *Modelling Space Heating Systems Connected to District Heating in Case of Electric Power Failure*, SIMS 2007 (International Conference of Scandinavian Simulation Society), Göteborg.
- [26] Johansson, P.-O., *Fjärrvärmeanslutna byggnaders värme- och varmvattensystem – Samverkan, komfort och sårbarhet*, licentiatavhandling, Institutionen för Energivetenskaper, Lunds tekniska högskola, Lund, 2007, ISRN LUTMDN/TMHP--07/7052--SE.
- [27] Krisberedskapsmyndigheten (KBM), *Krishantering i stormens spår*, dnr 0257/2005, www.krisberedskapsmyndigheten.se
- [28] Krisberedskapsmyndigheten (KBM), *Reservanordningar för kommunalteknisk försörjning – Erfarenheter från 18 års verksamhet med statsbidrag till kommuner*, dnr 1477/2006, www.krisberedskapsmyndigheten.se
- [29] Krisberedskapsmyndigheten (KBM), *Samhällets krisberedskap Förmåga 2006/2007*, dnr 0027/2007, www.krisberedskapsmyndigheten.se
- [30] Langley, B., *Electromechanical and electronic controls for HVAC/R*, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1999, ISBN 0-13-907569-0.
- [31] Ljunggren, P., *Fjärrvärmelast vid elavbrott*, Energivetenskaper, Lunds Universitet, 2006, ISRN LUTMDN/TMHP--06/3024--SE.
- [32] Ljunggren, P., *Optimal och robust drift av fjärrvärmecentraler – Avkylning och egenskaper vid elavbrott*, Licentiatavhandling, Energivetenskaper, Lunds Universitet, 2006, ISRN LUTMDN/TMHP--06/7043--SE.
- [33] Ljunggren, P. – Johansson, P.-O., *Fjärrvärmelast vid elavbrott – Avrapportering*, Energivetenskaper, Lunds Universitet, 2007, ISRN LUTMDN/TMHP--07/3031--SE.

- [34] Loustarinen, Tero, *Värdet av icke levererad fjärrvärme till kunder – fjärrvärmecentralens felfrekvenser i fjärrvärmesystem*, Rapport FoU 2005:11, Svensk Fjärrvärme AB, Stockholm, 2005.
- [35] Länsstyrelsen, Stockholms län, *Redovisning av tillgången på reservkraft m.m.*, maj 2001.
- [36] Länsstyrelsen, Stockholms län, *Säkerheten i Stockholms läns Fjärrvärmenät*, december 2004.
- [37] Overton, L., *Heating and Ventilating – Embracing hot water supply and air treatment*, 5:e upplagan, The Sutherland Publishing Co, Manchester, 1944.
- [38] Paulsson, G. – Elvin, H. – Theorell, A., *Värme, ventilation och sanitet*, Bokförlaget Natur och Kultur, Stockholm, 1949.
- [39] Persson, T., *District Heating for Residential Areas with Single-Family Housing*, doktorsavhandling, Institutionen för Värme- och Kraftteknik, Lunds tekniska högskola, 2005, ISBN 91-628-6504-8.
- [40] Petersson, S. – Werner, S., *Långtidsegenskaper hos lågflödesinjusterade radiatorsystem*, Rapport FoU 2003:88, Svensk Fjärrvärme AB, Stockholm, 2003.
- [41] Petersson, S. – Nyberg, B-E., *Funktion hos 1-rörs radiatorsystem – Avkylning, komfort och stabilitet*, Rapport FoU 2003:95, Svensk Fjärrvärme AB, Stockholm, 2003.
- [42] Proposition, *Förändrad omvärld – omdanat försvar*, prop. 1998/99:74.
- [43] Proposition, *Samverkan vid kris – för ett säkrare samhälle*, 2005/06:133.
- [44] Riksrevisionen, *Statens insatser för att hantera omfattande elavbrott*, Rapport RiR 2007:17, Stockholm, 2007.
- [45] Socialstyrelsen, *Isstormen i östra Kanada januari 1998*, SoS-rapport 2000:09, ISBN 91-7201-468-7.
- [46] Socialstyrelsen, *Det robusta sjukhuset*, artikelnr 2002-110-19, 2002, ISBN 91-7201-707-4.
- [47] Socialstyrelsen, *Krisberedskap i kommunernas socialtjänst 2004 - Rapportering av ett regeringsuppdrag*, artikelnr 2005-131-12, 2005.
- [48] Socialstyrelsen, *Temperatur inomhus*, Bergslagens Grafiska, Lindesberg, 2005, ISBN 91-7201-972-7.
- [49] Statens offentliga utredningar, *Säker elförsörjning*, SOU 1984:69.
- [50] Statens offentliga utredningar, *Hot- och riskutredningen*, SOU 1995:19.
- [51] Statistiska centralbyrån, SCB, *Energistatistik för småhus, flerbostadshus och lokaler 2005*, Rapport EN 16 SM 0604, 2006.
- [52] Svensk Fjärrvärme, *Din fjärrvärmecentral – En handbok för dig som sköter värme i huset*, Rapport 2004:1, 2004.
- [53] Svensk Fjärrvärme, *Fjärrvärmecentralen – Utförande och installation*, Tekniska bestämmelser F:101, 2008.

- [54] Svensk Standard, *Dimensionerande utetemperatur – Byggnaders effektbehov*, SS 02 43 10, 1991
- [55] Thörnqvist, I. – Sandberg, E., *VIK: Värmeförsörjning i kristid*, Statens Energiverk, 1990.
- [56] White, F. M., *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, 1999, ISBN 0-07-116848-6.

Muntliga referenser

- [57] Andersson, K., Mälarenergi, samtal 2008-06-16.
- [58] Bergqvist, O., TAC, samtal 2006-05-15.
- [59] Björkland, U., Belimo, samtal 2006-05-15.
- [60] Cedergren, J., Diana Control, samtal 2006-02-09.
- [61] Duimovich, R., TAC, samtal 2008-06-16.
- [62] Ehrlén, L., Växjö Energi AB, samtal 2006-09-27.
- [63] Göransson, T., E.ON Värme Sverige AB, Lagan, studiebesök, 2008-03-07.
- [64] Hansson, L., Siemens, samtal 2008-06-16.
- [65] Johansson, K., E.ON Värme Sverige AB, Lammhult, samtal 2008-03-07.
- [66] Stål, J-P, Beredskapssamordnare, Malmö stad, föredrag 2006-05-17.
- [67] Svensson, R., Siemens, samtal 2006-05-15.
- [68] Tordenmalm, O., Regin, samtal 2008-06-16.

Internet

- [69] Gothia Power – Slutrapport från seminariet Starta Malmö, 17 maj 2006, <http://www.gothiapower.com/products/seminarium.htm>
- [70] SABO – de allmännyttiga bostadsföretagens organisation, www.sabo.se, hämtad 2007-10-08.

BILAGA A – PRAKTISKA FÖRSÖK MED SJÄLVCIRKULATION

ALLMÄNT OM MÄTMETODIKEN

Vid samtliga fältförsök (förutom i Karlshamn) gjordes temperaturmätningar i fjärrvärmecentralen med utanpåliggande temperaturgivare av typen Pt 100. Dessa anslöts till en datalogger av typen PC 2100 från INTAB. Byggnaden i Karlshamn ingår i ett annat projekt och var redan utrustad med temperaturgivare och flödesmätare. För flödesmätning i övriga objekt användes fjärrvärmecentralens debiteringsmätare för att läsa av fjärrvärmeflödet till radiatorkretsen genom att tillfälligt stänga primärventilen till tappvarmvattenberedningen. Radiatorflödet kan på så sätt beräknas genom en energibalans för radiatorvärmväxlaren enligt sambandet:

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_p \cdot c_p (T_{p,f} - T_{p,r}) = \dot{m}_s \cdot c_p (T_{s,f} - T_{s,r}) \Rightarrow \dot{m}_s, \dot{Q}_r$$

I vissa objekt har kompletterande mätningar gjorts i radiatorsystemet. Dessa har gjorts med termoelement av typen T och K anslutna till en PC 2100-logger eller med filmburksloggrar av typen Tinytag. I viss mån har även en clamp-onultraljudsmätare använts för direkt mätning av radiatorflödet. Detta visade sig dock vara svårt då flödena vid självциркуlation blir mycket små och flödestemperaturen förändras kraftigt.

Samtliga försök följde ett på förhand bestämt schema som är beskrivet i Bilaga A. Kort kan det beskrivas som: montering av temperaturgivare på primär- och sekundärsidan av radiatorväxlaren, låsning av regleringen av primärflöde till radiatorväxlaren, bestämning av primär och sekundärflöde genom radiatorväxlaren. Därefter följer själva elavbrottet som simuleras genom att regleringen av radiatorväxlaren låses i aktuell position och strömmen till cirkulationspumpen stängs av. Avbrottet avslutas sedan efter antingen att stabila temperaturförhållanden råder, att ingen självциркуlation uppstår eller att det finns risk för olägenhet för boende eller verksamhet i testobjektet.

Felkällor

Vid den här typen av mätexperiment är det oundvikligt med vissa felkällor och begränsningar. Exempel på sådana, och deras konsekvenser, är:

- Utanpåliggande temperaturmätning. En viss tidskonstant införs samt eventuellt ett mätfel orsakat av bristfälligt isolering av givaren.
- Primärflödet mäts inte kontinuerligt (då flödesmätare visat sig besvärligt att installera på primärsidan) utan avläses manuellt och antecknas med jämna mellanrum. Korta variationer av primärflödet kan bli förbisedda.

- Antalet mätpunkter på sekundärsidan (i radiatorsystemet samt inomhustemperatur) är mer eller mindre begränsat på grund av tillgänglighet och att arbetet är tidskrävande.

Sammanfattningsvis kan man dock slå fast att mätnoggrannheten är tillfredsställande för försökens ändamål. Vi vill uppskatta hur stor självirkulation som kan uppstå i olika byggnader och systemtyper och få en uppfattning om hur värmen sprider sig i systemen. De eventuella mätfel som kan orsakas av ovanstående felkällor får betraktas som fullt acceptabla.

GENOMFÖRANDE

Testen har inletts med att temperaturgivare (av Pt100-typ) monterats på ingående och utgående primär- respektive sekundärflöde till radiatorväxlaren. Temperaturerna har registrerats med en datalogger och bevakats på plats med en dator. För eventuell fördelningsmätning har temperaturgivare monterats på lämpliga platser i radiatorsystemet. För att bestämma radiatorflödet har fjärrvärmeflödet avlästs på fjärrvärmebolagets energimätare. Med en energibalans kan det normala radiatorflödet beräknas som:

$$\dot{m}_{rad} = \dot{m}_{FV} \frac{(T_{fram} - T_{retur})_{FV}}{(T_{fram} - T_{retur})_{rad}}$$

För att kunna fastställa det fjärrvärmeflöde som går till radiatorväxlaren måste dock flödet som går till tappvarmvattenväxlaren räknas bort. Detta har åstadkommit genom att tillfälligt stänga tappvarmvattenkretsens styrventil. Ett stabilt flöde på energimätaren har inväntats (tar 10-30 sekunder) och där efter har tappvarmvattenkretsen öppnats igen. På detta sätt blir risken för störningar för brukarna obefintlig. Flödeskontrollen har upprepats med jämna mellanrum under försökens gång för att kontrollera om fjärrvärmeflödet (differenstrycket) förändrats.

Nästa steg har varit att låsa regleringen av radiatorkretsen. Vår utgångspunkt har varit att undersöka vad som händer om ventilen antas stanna i sitt läge. För att åstadkomma detta finns olika tillvägagångssätt, antingen har ventilen satts i manuellt läge i DUC:en eller direkt på ställdonet. Därefter har försöken kunnat inledas genom att stänga av pumpen, i DUC:en eller med strömbrytare.

I mindre byggnader har stabila temperatur- och flödesnivåer infunnit sig inom en timme, men upp till fyra timmar har varit nödvändigt i lite större hus. Försöken har avslutats genom att slå på pumpen. Därefter har normal nivå på radiatorframledningen inväntats innan regleringen återställts.

FÖRENKLAT FÖRFARANDE

Om man inte har tillgång till någon mätutrustning eller helt enkelt vill genomföra ett enklare försök med lägre krav på mätnoggrannhet, följer här ett förslag på ett förenklat tillvägagångssätt. Försökets utveckling kan följas med hjälp av fjärrvärmebolagets energimätare, befintliga instickstermometrar, papper och penna.

1. För att kunna fastställa det fjärrvärmeflöde som går till radiatorväxlaren måste flödet som går till tappvarmvattenväxlaren räknas bort. Stäng tillfälligt tappvarmvattenkretsens

styrventil. Läs av fjärrvärmeflödet på fjärrvärmebolagets energimätare. Invänta ett stabilt flöde (tar 10-30 sekunder) och öppna sedan tappvarmvattenkretsen igen. Radiatorflödet och den aktuella effekten beräknas som:

$$\dot{m}_{rad} = \dot{m}_{FV} \frac{(T_{fram} - T_{retur})_{FV}}{(T_{fram} - T_{retur})_{rad}} \text{ respektive } \dot{Q}_{rad} = \dot{m}_{rad} \cdot c_p \cdot (T_{fram} - T_{retur})_{rad}.$$

Upprepa flödeskontrollen med jämna mellanrum under försökets gång för att kontrollera att fjärrvärmeflödet är så stabilt som möjligt.

2. Lås styrventilen för reglering av uppvärmningssystemet. Antingen kan ventilen sättas i manuellt läge i DUC:en eller så görs det direkt på ställdonet.
3. Upprepa punkt 1.
4. Stäng av cirkulationspumpen till uppvärmningssystemet (i DUC:en, alternativt med strömbrytare). Finns det shuntkopplingar i systemet måste även pumpar i dessa stängas av.
5. Kontrollera att den sekundära framledningstemperaturen stiger.
6. Upprepa punkt 1.
7. Vänta till sekundär fram- och returledning har stabiliserats. Det bör ta 1-4 timmar.
8. Dokumentera försöket genom att notera temperaturer och räkna fram den inmatade effekten enligt punkt 1. Uppskatta fördelningen av värme i värmesystemet genom att känna på stammar och, om möjligt, radiatorer runt om i systemet.
9. Upprepa punkt 1.
10. Starta cirkulationspumpen till uppvärmningssystemet samt andra eventuella pumpar och ventilation.
11. Vänta till sekundär framledningstemperatur har återställts till ungefär samma nivå som innan försöket startades.
12. Återställ regleringen av uppvärmningskretsen.
13. Kontrollera att de sekundära temperaturerna återgår till normal nivå.

Tänk på att det ibland kan vara något larm som löser ut i DUC:en när regleringen eller pumpen bryts.

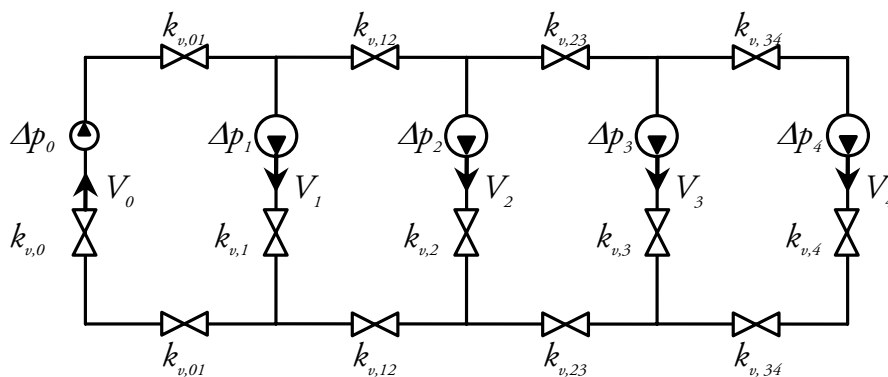
Försöket kan genomföras vid de flesta utomhustemperaturer. Den sekundära framledningstemperaturen kommer att bli nästan lika varm som den primära framledningstemperaturen som under eldningssäsongen i regel ligger över 80°C. Undvik dock temperaturer över ca 10°C i kombination med sol, vilket kan leda till att termostatventiler stänger.

Kontrollera om det finns ventilationsaggregat, torkkretsar eller liknande anslutet till radiatorkretsen. De kan vara utrustade med pumpar eller ge upphov till hydrauliska kortslutningar som "förstör" själv-cirkulationen. Observera att utrymmen med stora luftflöden (t ex ett storkök) kan få kall inblåsningluft om inte ventilationen stängs av. Tänk också på att radiatorerna kan bli mycket varma, något man bör vara uppmärksam på om det exempelvis finns en förskola i byggnaden.

BILAGA B – BAKGRUND TILL BERÄKNINGAR

FLÖDESFÖRDELNING VID SJÄLVCIRKULATION

I avsnittet Hinder för självциirkulation – Fördelning i hus visades resultatet av en parametervariation som illustrerade hur flödet i vissa stammar kan bli negativt om höjden på stammarna (i förhållande på höjden av den horisontella kretsen) är tillräckligt hög. Figur 34 visar ett kretsschema baserat på ett (förenklat) system bestående av fyra stammar. Alla ventiler i kretsen motsvarar tryckförlusterna i rör, radiatorer, injusteringsventiler och värmeväxlare. Deras kapacitet anges med ett k_v -värde. Differenstrycken på grund av densitetsskillnader symboliseras av pumpar.



Figur 34 Ett förenklat radiatorsystem med fyra stammar presenterat som ett kretsschema.

Nu kan följande vedertagna samband mellan tryckfall och (turbulent) flöde för en komponent användas:

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{V}}{k_v} \right)^2 \quad (4)$$

Observera att även vid självциirkulation gäller generellt att flödena är turbulenta. Om flera komponenter är seriekopplade gäller att:

$$\Delta p_{tot} = \left(\frac{\dot{V}_{tot}}{k_{v,1}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{V}_{tot}}{k_{v,2}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\dot{V}_{tot}}{k_{v,N}} \right)^2 \quad (5)$$

En ekvivalent kapacitet kan tecknas:

$$k_{v,ekv,serie} = \frac{\dot{V}_{tot}}{\sqrt{\Delta p_{tot}}} \quad (6)$$

Ekvation (3) insatt i (4) ger efter förenkling:

$$k_{v,ekv,serie} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{k_{v,1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_{v,2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{k_{v,N}}\right)^2}} \quad (7)$$

För parallellkopplade komponenter blir tryckfallet över respektive komponent lika stort om man kan teckna:

$$\dot{V}_{tot} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_N = (k_{v,1} \cdot \sqrt{\Delta p_{tot}}) + (k_{v,2} \cdot \sqrt{\Delta p_{tot}}) + \dots + (k_{v,N} \cdot \sqrt{\Delta p_{tot}}) \quad (8)$$

Av detta följer att:

$$k_{v,ekv,parallell} = k_{v,1} + k_{v,2} + \dots + k_{v,N} \quad (9)$$

Det är nu möjligt att ställa upp ett ekvationssystem för hela kretsen enligt:

$$\begin{cases} \Delta p_{34} = -\left(\frac{1}{k_{v,34}^2} + \frac{1}{k_{v,4}^2}\right) \cdot \dot{V}_4^2 + \Delta p_4 = \Delta p_3 - \frac{1}{k_{v,3}^2} \cdot \dot{V}_3^2 \\ \Delta p_{23} = -\frac{1}{k_{v,23}^2} \cdot (\dot{V}_3^2 + \dot{V}_4^2) + \Delta p_{34} = \Delta p_2 - \frac{1}{k_{v,2}^2} \cdot \dot{V}_2^2 \\ p_{12} = -\frac{1}{k_{v,12}^2} \cdot (\dot{V}_2^2 + \dot{V}_3^2 + \dot{V}_4^2) + \Delta p_{23} = \Delta p_1 - \frac{1}{k_{v,1}^2} \cdot \dot{V}_1^2 \\ p_{12} = \left(\frac{1}{k_{v,0}^2} + \frac{1}{k_{v,01}^2}\right) \cdot (\dot{V}_1^2 + \dot{V}_2^2 + \dot{V}_3^2 + \dot{V}_4^2) - \Delta p_0 = \Delta p_1 - \frac{1}{k_{v,1}^2} \cdot \dot{V}_1^2 \end{cases} \quad (10)$$

Ekvationssystemet kan överföras till matrisform enligt:

$$\mathbf{A} \cdot \dot{\mathbf{V}}^2 = \mathbf{b} \quad (11)$$

där

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -\left(\frac{1}{k_{v,34}^2} + \frac{1}{k_{v,4}^2}\right) / \frac{1}{k_{v,3}^2} \\ 0 & 1 & -\left(\frac{1}{k_{v,23}^2} + \frac{1}{k_{v,3}^2}\right) / \frac{1}{k_{v,2}^2} & -\frac{1}{k_{v,23}^2} / \frac{1}{k_{v,2}^2} \\ 1 & -\left(\frac{1}{k_{v,12}^2} + \frac{1}{k_{v,2}^2}\right) / \frac{1}{k_{v,2}^2} & -\frac{1}{k_{v,12}^2} / \frac{1}{k_{v,1}^2} & -\frac{1}{k_{v,12}^2} / \frac{1}{k_{v,2}^2} \\ 1 + \frac{1}{k_{v,1}^2} / \left(\frac{1}{k_{v,0}^2} + \frac{1}{k_{v,01}^2}\right) & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{V}}^2 = \begin{pmatrix} \dot{V}_1^2 \\ \dot{V}_2^2 \\ \dot{V}_3^2 \\ \dot{V}_4^2 \end{pmatrix}$$

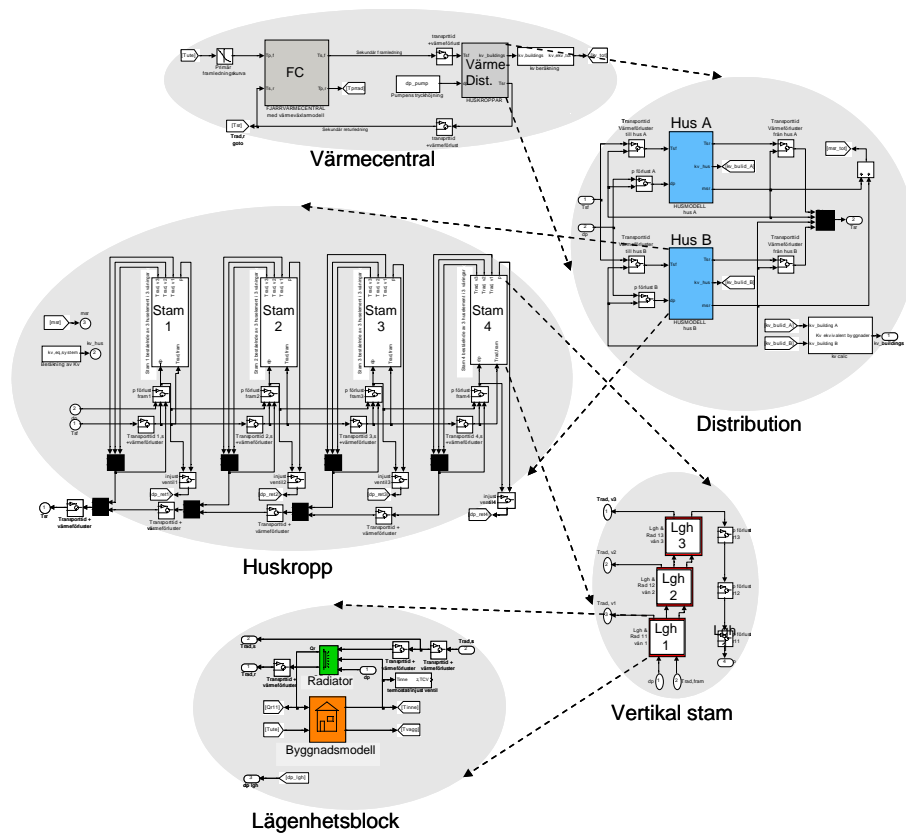
$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} (\Delta p_3 - \Delta p_4) / \frac{1}{k_{v,3}^2} \\ (\Delta p_2 - \Delta p_3) / \frac{1}{k_{v,2}^2} \\ (\Delta p_1 - \Delta p_2) / \frac{1}{k_{v,1}^2} \\ (\Delta p_0 - \Delta p_1) / \left(\frac{1}{k_{v,0}^2} + \frac{1}{k_{v,01}^2}\right) \end{pmatrix}$$

Ur ekvation (9) kan de olika flödena (V_0, V_1, V_2, V_3, V_4) beräknas vid olika differenstryck och k_v -värden.

BESKRIVNING AV SIMULERINGSMODELL

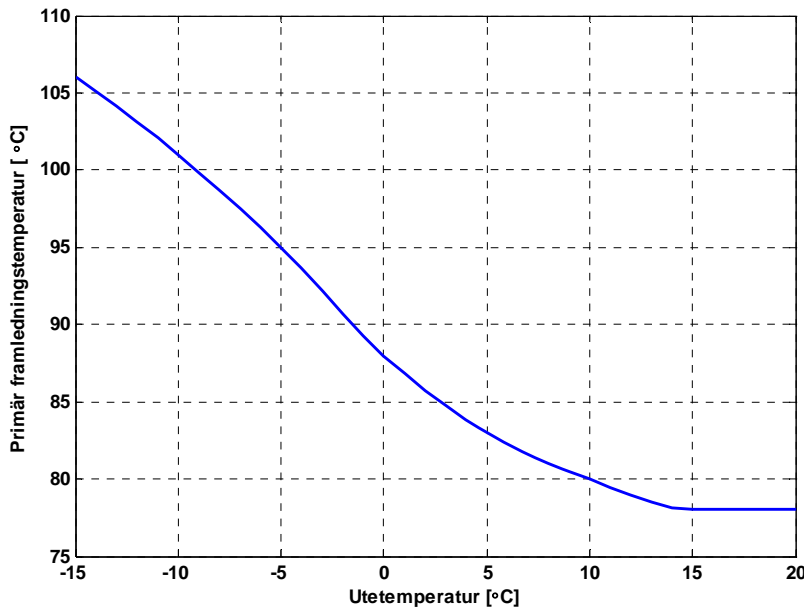
Simuleringarna bygger på en modell sammansatt av värmeväxlare, regulator, radiatorer, injusteringsventiler, kopplingsledning, huskroppar etc. Dessa komponenters funktion och teori beskrivs utförligt av flera författare, se till exempel [21], [23] och [39]. De modifieringar som gjorts av modellerna för att kunna simulera självциркуlation finns beskrivna i [25].

Modellen består, något förenklat, av en fjärrvärmecentral med reglerutrustning, rörledningar och huskroppar. Varje huskropp har ett värmesystem bestående av fyra vertikala stammar, som var och en förser tre lägenhetsblock med värme. Se Figur 35 för principiell uppbyggnad av modell nummer 2.



Figur 35 Principiell modelluppbyggnad i Simulink för modell 2 med två huskroppar.

För samtliga simuleringar har den primära framledningstemperaturens beroende av utomhustemperaturen antagits följa profilen för Malmö och visas i Figur 36.



Figur 36 Antagande gällande primär framledningstemperatur som funktion av utombustemperaturen.

I modellen har en rad avgränsningar gjorts. Vissa saker är väsentliga för att kunna simulera självcirkulationen väl medan vissa begränsningar måste göras för att inte modellen ska bli orimligt stor. Nedan listas de mest väsentliga antaganden och begränsningar som gjorts:

- Husväggen modelleras med tre sektioner för att få korrekt dynamik i inomhustemperaturen
- Komponenterna i systemet är hydrauliskt sammanbundna
- Det finns däremot ingen termodynamisk koppling mellan de olika lägenhetsblocken
- Tryckfallet i systemet är proportionellt med volymflödet i kvadrat
- Luft som löser ut modelleras inte
- Temperaturförlusterna från rörledningarna i systemet är flödesberoende, likaså transporttiderna

Att husväggen delas upp i tre sektioner innebär att en dynamisk förändring av inomhustemperaturen kan studeras (se Utkylning av byggnader). Uppdelningen av husväggen beskrivs mer detaljerat i [32]. Att systemet är hydrauliskt sammanbundet innebär att alla komponenter är sammankopplade och påverkar varandra. Om differenstrycket i systemet blir för lågt, så kommer den eller de minst hydrauliskt gynnsamt placerade lägenhetsblocken att få ett lägre flöde. Avsaknaden av termodynamisk koppling mellan lägenhetsblocken innebär att temperaturen i lägenhetsblocken inte har någon påverkan på varandra. Utan denna förenkling skulle modellen bli avsevärt mycket mer komplicerad och kräva längre simuleringstider. Konsekvensen av detta antagande är att om radiatorflödet är

ojämnt fördelat i systemet så kommer inte inomhustemperaturen i respektive lägenhetsblock vara korrekt då värmeledningen mellan blocken bortses ifrån. Medeltemperaturen i byggnaden blir dock korrekt. Dessutom blir avsaknaden av värmeledning endast tydlig vid ojämna flöden under lång tid eftersom värmeledningen är mycket långsam.

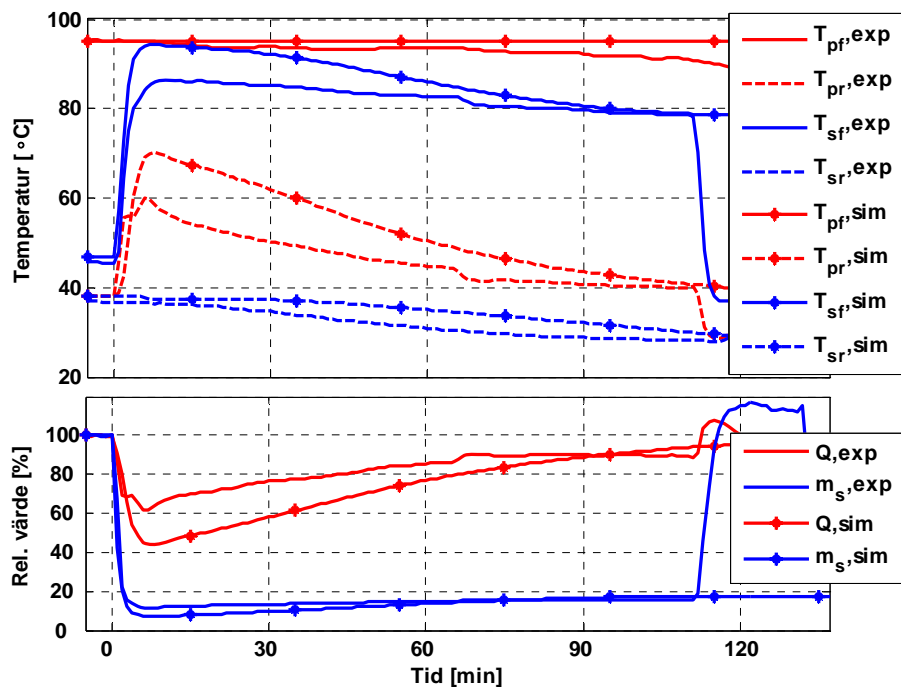
Då inverkan av en förändrad primär framledningstemperatur studeras sker förändringen i samma ögonblick som elavbrottet infaller. Självfallet skulle det inte gå till så i verkligheten. Dock har detta mindre praktisk betydelse när framledningstemperaturen förändras. Vi vill framför allt se den långsiktiga effekten av att ändra framledningstemperaturen.

I hydrauliska system antas tryckfallet, vid fullt utvecklad turbulens, vara proportionellt mot volymflödet i kvadrat. Vid laminärt flöde är förhållandet däremot linjärt. Detta tas inte hänsyn till i modellen av två anledningar. Dels har det visat sig att man sällan får laminära flöden ens vid självcirkulation, dels så blir skillnaden relativt liten i absoluta tal om man räknar turbulent istället för laminärt. Dessutom blir det beräknade tryckfallet större om man räknar turbulent än om man räknar laminärt. Det innebär att man kan vara säker på att man inte underskattar tryckförlusterna och därmed får för hög självcirkulation. En annan faktor som påverkar strömningsförhållandena vid självcirkulation är det faktum att luftens löslighet i vatten minskar vid ökande temperatur. Om luft löser ut stiger den i systemet och lägger sig i de högsta punkterna. Genomströmningsarean minskar då vilket innebär ökat strömningsmotstånd. Effekten av detta är osäker och ingår inte i modellen.

Två effekter som tas hänsyn till i modellen är temperaturförluster och transporttider i rörsystemet. Då dessa två är flödesberoende kan de normalt bortses ifrån vid simulering av ett radiatorsystem vid normal drift eftersom de blir mycket små. Vid självcirkulation är de däremot av större betydelse.

Simuleringarna är utförda för både modell nummer 1 och modell nummer 2. Den relativa värmelasten vid varierande utomhustemperatur har simulerats, liksom inverkan av en förändrad primär framledningstemperatur samt resulterande genomsnittligt utkylningsförlopp för fastigheterna.

Resultaten från simuleringarna gäller för konstanta utomhustemperaturer, något som inte förekommer i verkligheten. Byggnadernas reglering av värmeförseln beror bland annat på aktuell utomhustemperatur samt tidigare utomhustemperaturer (beroende på dämpning av utomhustemperaturen). Systemens exakta egenskaper, d.v.s. resulterande inomhustemperatur, returtemperatur, flöde och effekt beror på systemets fysiska egenskaper. Att efterlikna ett specifikt testobjekt i detalj skulle därför bli mycket tidsödande och knappast meningsfullt. Överensstämmelsen mellan modellen och verkliga objekt blir ändå mycket god, i synnerhet vid en stationär betraktelse, d.v.s. när temperaturer och flöde svängt in sig på jämn nivå. Figur visar en jämförelse mellan modell nummer 1 och försöket som visades i Figur 7.



Figur 37 Jämförelse mellan testresultat från byggnaden i Figur 7 och simulering av modell 1.

BILAGA C – BEDÖMNING AV MÖJLIGHETER TILL SJÄLVCIRKULATION

Då man kanske inte har möjlighet att gå ut och testa olika byggnader, vilket blir tidsödande i längden, har här gjorts ett försök att ta fram en manual för att kunna uppskatta förutsättningarna för självциркуlation i en godtycklig byggnad, utifrån ett antal egenskaper hos byggnaden. Tanken är att man går igenom ett antal punkter som beskriver byggnaden och radiatorsystemet, såsom byggnadens storlek och utformning, typ av radiatorsystem etc. Baserat på de praktiska försöken kan man schablonmässigt uppskatta hur mycket förmåga till självциркуlation som går förlorad på grund av olika faktorer. Den här metoden kan självfallet aldrig med säkerhet säga hur en specifik byggnad kommer att fungera, men kan utgöra ett värdefullt stöd om man exempelvis vill klassificera byggnadsbeståndet på en ort eller i olika stadsdelar.

Använd tabellen enligt följande: Utgångspunkten är att en äldre byggnad som inte har några av de hinder som tagits upp i rapporten genom självциркуlation kan behålla 85 procent av den aktuella värmeförseln vid dimensionerande utetemperatur.

När man värderar bedömningen av en byggnad kan man väga in det faktum att drygt 60 procent av effekten vid dimensionerande utetemperatur är tillräckligt för att hålla +5°C inomhus. Vidare bör man ha i åtanke att fördelningen av värmen kan bli mycket ojämn i stora byggnader, särskilt om flera byggnader har ett gemensamt system. Halv effekt kan då innebära att ena halvan av en byggnad får full effekt medan andra halvan inte får någon värme alls.

Egenskaper hos uppvärmningssystemet	Ja / Nej	Om Ja, multiplicera 85 % med:
Ålder – Är systemet byggt 1965 eller senare?	<input type="checkbox"/>	0,9
Är radiatorsystemet av 1-rörstyp?	<input type="checkbox"/>	0,8
Finns det mer än en byggnad ansluten till samma fjärrvärmecentral?	<input type="checkbox"/>	0,6
Är byggnaden mycket hög och/eller horisontellt utbredd?	<input type="checkbox"/>	0,8
Är fjärrvärmecentralen ansluten till ett sekundärnät?	<input type="checkbox"/>	0,7
Är värmeväxlaren ”felvänd”, dvs. utgående radiatorflöde i botten?	<input type="checkbox"/>	0,6
Finns det shuntkopplingar i radiatorsystemet?	<input type="checkbox"/>	0,8
Finns det ventilationsaggregat anslutna till radiatorkretsen?	<input type="checkbox"/>	0,8
Är styrventilen av självstängande typ?	<input type="checkbox"/>	0
Uppskattad värmelast: (Multiplicera 85 % med respektive förekommande faktor)		