INSTITUTIONEN FÖR VÄRME- OCH KRAFTTEKNIK
ENERGIHUSHÅLLNING

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND



Optimalt val av värmemätares flödesgivare

Janusz Wollerstrand

FoU rapport, FJV

DEPARTMENT OF HEAT AND POWER ENGINEERING
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
P.O. BOX 118, SE-221 00 LUND
SWEDEN

Sammanfattning

Rapporten beskriver en experimentell/teoretisk undersökning av prestanda hos flödesmätare som används vid debitering av värmeförbrukning i fjärrvärmecentraler. Undersökningen belyser hur förbrukningsmönster av fjärrvärmevatten i olika stora fjärrvärmecentraler i samverkan med flödesmätarens varierande noggrannhet beroende på dess typ, storlek, arbetsområde och driftläge, inverkar på noggrannheten i värmedebitering. Fjärrvärmevattnets årsförbrukningsmönster simuleras fram med hjälp av en dynamisk modell, där olika stora bostadshus med hög- och lågtemperaturradiatorsystem, simulerad tappvarmvattenförbrukning samt tillhörande fjärrvärmecentral ingår. Flödesmätare karakteriseras genom antingen teoretiska eller uppmätta kalibreringskurvor. I det senare fallet ingår både fabriksnya mätare och sådana som varit i drift under 2 alternativt 5 års tid. Undersökningen resulterar i ett antal slutsatser och rekommendationer användbara då man i värmemätningsammanhang skall välja optimal flödesmätarstorlek beroende på hur stort huset/fjärrvärmecentralen, där mätaren skall placeras, är. Det konstateras bl a att flödesmätare för värmedebitering i en villa kräver större arbetsområde än motsvarande mätare i flerbostadshus, samt att en och samma mätarstorlek kan användas i flerbostadshus av varierande storlek. Det konstateras även att Fjärrvärmeföreningens aktuella råd och anvisningar för dimensionering av fjärrvärmecentraler ger bra underlag för dimensionering av flödesmätare för värmedebitering. Rekommendationerna gäller med vissa inskränkningarna men är enkla att generalisera.

Summary

The paper describes experimental and theoretical investigation of the performance of flow meters of the type used for heat metering in district heating substations. The influence of district heating water flow rate variation on the total heat metering accuracy, depending on the flow meter type, size, operating range and flow measurement accuracy variation within the operating range, is explained. The district heating water flow rate variation pattern, during one year, is simulated using a dynamic simulation model. The model describes residential buildings of three different sizes, equipped with space heating systems of low or high temperature level type (according to the Swedish practice) as well as district heating substations. A simulated domestic hot water consumption pattern is used. The flow meter characteristics are described by means of calibration curves which can be of theoretical kind or measured. In the latter case the laboratory tests have been done using both new flow meters and flow meters which have been in operation for 2 or 5 years. The investigation results in a number of conclusions and recommendations concerning the optimum choice of the flow meter size, depending on the size of the building and the district heating substation employed. Among other facts it is stated that heat metering in a semi-detached house demands a flow meter having large operating range compared to those used in residential buildings. It is also stated that a wide size range of the residential buildings can be served by same size of flow meter. The conclusions and recommendations are valid with some restrictions but the restrictions are easy to be taken to account. Finally, it is found that sizing of the flow meters can be based on the recommendations for design of district heating substations, published by the Swedish District Heating Association.

Innehållsförteckning

Förord 4
1 Inledning 5
2 Metodik 6
3 Flödesmätarens egenskaper 7
3.1 Allmänt 7
3.2 Den nya normnomenklaturen 7
3.3 Mätnoggrannheten 7
4 Simulering av förbrukning av fjärrvärmevatten 9
4.1 Radiator- och husmodellen 9
4.2 Tappvarmvattenförbrukning 9
4.3 Fjärrvärmecentralmodellen 10
4.4 Resultat av simulering 11
4.5 Inflytande av mätarens arbetsområde på energimätning 13
5 Inflytande av valet av mätare av olika typ och storlek 16
5.1 Allmänt 16
5.2 Syntetiska kalibreringskurvor 16
5.2 Kalibreringskurvor hos nya flödesmätare 21
5.3 Kalibreringskurvor hos använda flödesmätare 26
6 Slutsatser och rekommendationer 32
7 Referenser 35
List of figures 36
List of tables 38

Förord

Föreliggande rapport utgör resultat av forskning vid Institutionen för värme- och kraftteknik, LTH, dels som sommarprojekt utförda 1997 och 1998 av den nordiske stipendiaten, MSc-studerande Ari Ingimundarson (1997, 1998), med rapportens författare som handledare, dels som ett internt projekt genomfört av författaren. Delresultat från projektet har publicerats som ett konferensbidrag till FLOMEKO'98 med Ingimundarsson, Wollerstrand och Lars Arvastson från Institutionen för matematisk statistik, LTH, som författare (1998). Projektet genomfördes i samarbete med Svenska Fjärrvärmeföreningen och Göteborgs Energi AB, som välvilligt bidragit med mätdata, givande erfarenhetsutbyte och ett antal mätare för laboratorieprovning. Mätarna var testade vid Sydkraft Mätteknik AB som på ett flexibelt sätt utförde det uppställda mätprogrammet. För en del av de tyngre beräkningarna utnyttjades datorkapacitet vid Institutionen för matematisk statistik, LTH.

Författaren vill framföra sitt tack till alla som bidragit till rapportens slutliga innehåll, speciellt Lars Arvastsson som bidragit med sin statistiska kompetens och Jan Eliasson från Göteborgs Energi AB som delat med sig av sina erfarenheter inom mätarteknik, prof. Jerker Delsing från LuTH och prof. Jan Holst från LTH för intressanta kommentar. Ett tack för diskussioner och synpunkter under arbetets gång riktas även till prof. Sture Andersson och till doc Svend Frederiksen från fjärrvärmegruppen vid Institutionen för värme- och kraftteknik samt till medlemmarna av projektets styrgrupp inom ramen för högskoleforskning finansierad av Svenska Fjärrvärmeföreningen och av Statens Energimyndighet.

Ett speciellt tack riktas till Ari Ingimundarson som visat stort engagemang för projektet, och som förutom att ha förberett och utfört en stor del av det praktiska beräkningsarbetet i Matlab/Simulink, lämnat förslag och synpunkter som har bidragit till projektets slutresultat.

Författaren vill även påpeka att mätarfabrikat som diskuterats inom projektet var valda något slumpmässigt beroende dels på vilka flödesmätare som lagerhölls hos Göteborgs Energi AB under maj månad 1998, dels på tillgången till kontrollmätningar vad gäller använda mätare. Syftet var att undersöka inflytandet av flödesmätarnas individuella egenskaper på noggrannheten i värmedebitering och inte att genomföra någon heltäckande undersökning av prestanda hos marknadens flödesmätare. Således, att något mätarfabrikat utelämnades helt eller att en äldre flödesmätarmodell undersöktes istället för en ny, förbättrad modell, innebär inte något som helst ställningstagande från författarens sida.

1 Inledning

Energiförbrukning i fjärrvärmecentraler registreras med hjälp av energimätare vilka normalt består av en flödesmätare, två temperaturgivare och ett integreringsverk. Den totala noggrannheten av energimätaren beror i första hand på den sammanlagda noggrannheten hos dess komponenter. Förutom komponenternas inbyggda mätosäkerhet, som ofta ändras under drifttiden, kan även yttre störningar och installationsfel inverka. Flödesmätaren är normalt sett den som påverkar den sammanlagda noggrannheten mest.

Ur både värmeleverantörens och kundens synvinkel är energimätarens momentana mätnoggrannhet vid en viss belastning i enskild fjärrvärmecentral av sekundärt intresse. Det viktiga är däremot noggrannheten i den värmemängd som integrerats fram under en längre driftsperiod och som är underlag för debitering. Man önskar sig således en mätare som kännetecknas av långtidsstabilitet och hög noggrannhet inom ett område som överensstämmer med nivån av de mest frekventa belastningar som skall registreras. Det är dock vanligen oklart vilka belastningar som är oftast förekommande i kundens fjärrvärmecentral. För att bedöma om en flödesmätare är mer eller mindre lämplig för värmemätning i en central av given typ och storlek måste man skaffa sig kännedom om hur centralen belastas under en längre tidsperiod.

Fjärrvärmecentraler utsätts huvudsakligen för två typer av belastning – radiatorlast och tappvarmvattenlast. Dessa belastningar har helt olika egenskaper. Radiatorlasten är högst på vintern för att, beroende på aktuell breddgrad, minska eller upphöra helt under sommarhalvåret. Till denna säsongsbetonade variation tillkommer mindre dygnsvariationer som förutom rådande utomhustemperatur, solinstrålning, vindhastighet och även byggnadens interna värmekällor, kan bero på tekniska ingrepp såsom t ex nattsänkning och morgonhöjning av radiatortemperaturen mm (Frederiksen & Werner 1993). Sammanlagt kan man konstatera att radiatorlasten förändras förhållandevis långsamt.

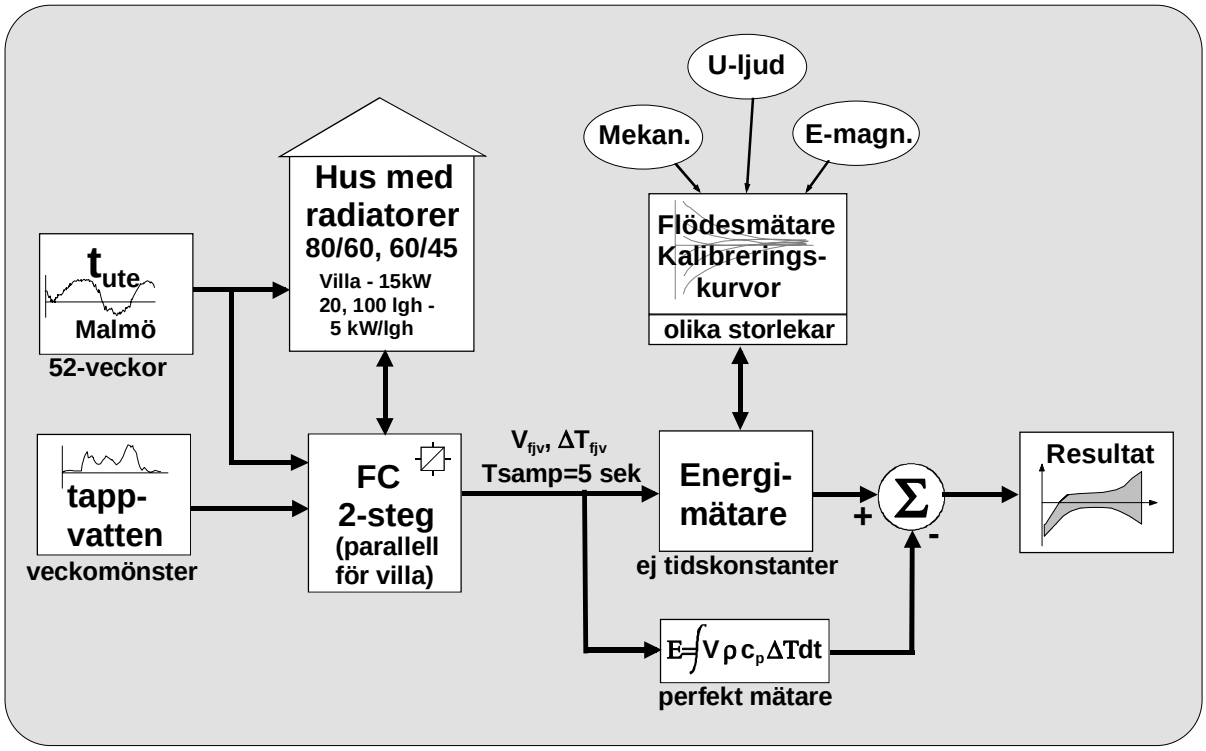
Tappvarmvattenlasten varierar måttligt med årstiden, under dygnet varierar den däremot kraftigt och har en stokastisk karaktär. Sannolikheten att en tappning uppstår och dess storlek varierar beroende på tiden på dygnet och på typ av tappställe (Holmberg 1987). En viktig faktor när tappvarmvattenlasten analyseras är dess sammanlagring beroende på antalet tappställen/lägenheter som betjänas av en och samma fjärrvärmecentral. Sammanlagringen ökar kraftigt så fort antalet lägenheter i ett bostadshus är större än ett och uppnår mättnad vid c:a 200 lägenheter. Därav följer att lastdynamiken i en fjärrvärmecentral varierar beroende på den anslutna byggnadens storlek. Detta förhållande kommer att belysas mer längre fram.

I fjärrvärmebranschen finns en allmän åsikt att flödesmätare som ingår i värmemätare för det mesta är överdimensionerade 100% eller mer (Aronsson 1996, Svensson 1996). Med tanke på att flödesmätarens noggrannhet varierar med belastning blir de förmodligen negativa konsekvenserna som en sådan överdimensionering har intressanta ur debiteringssynvinkel. En annan infallsvinkel är att investeringsbesparingar, beroende på prissättningen, kunde uppnås om man kunde gå över till mindre storlekar av flödesmätare. En begränsande faktor i sammanhanget är tryckfallet över flödesmätaren vilket ökar om mindre mätare väljs för samma arbetsuppgift. Bland dagens flödesmätare finns dock utföranden där det av branschen tillåtna maximala tryckfallet (25 kPa vid kontinuerlig drift) uppnås först vid överbelastning.

Föreliggande rapport fokuserar på inverkan av flödesmätarens egenskaper på resultat av värmemätning i olika stora fjärrvärmecentraler.

2 Metodik

Figur 1 visar schematiskt den valda metodiken vid undersökning av inverkan av val av flödesmätare på energimätningens noggrannhet i fjärrvärmeanslutna bostadshus.



Figur 1 Blockschema som illustrerar metodiken vid undersökning av inverkan av val av flödesmätare på energimätningens noggrannhet.

I etapp 1 simuleras flöde och avkylning av fjärrvärmevattnet i fjärrvärmecentraler av olika storlekar. En tidigare framtagen dynamisk hus- och fjärrvärmecentralmodell (Ingimundarson 1997) modifieras successivt så att olika husstorlekar och olika temperaturprogram i fjärrvärmenätet och i husets radiatorkrets kan simuleras. Timmedelvärden av utomhustemperatur uppmätta i Malmö under 1996/97 och simulerat tappvarmvattenförbrukningsmönster (Arvastsson & Wollerstrand 1997) används som indata (se figur 5 längre fram).

I etapp 2, används resultat från etapp 1 för beräkning av skillnaden mellan den simulerade årsförbrukningen av energi i respektive fjärrvärmecentralmodell, och den förbrukning som skulle erhållas om fjärrvärmevattenförbrukningen var uppmätt med olika typer av flödesmätare. Följande typer av kalibreringskurvor som beskriver flödesmätarens noggrannhet har använts:

- 6 hypotetiska kurvor
- kurvor baserade på kalibrering av 6 nya mätare av olika typ/storlek
- kurvor baserade på kontrollmätning av mätare av 5 olika typer, minst 10 enheter av varje typ, som varit i drift under 2 eller 5 år – mekaniska (rörliga) resp statiska.

Slutligen analyseras fel i de beräknade energiförbrukningarna och anvisningar för lämpligt val av flödesmätare beroende på husstorlek tas fram.

3 Flödesmätarens egenskaper

3.1 Allmänt

Flödesmätarens egenskaper beror på dess typ och kvalité. Generellt skiljer man på mekaniska och statiska mätare. De huvudsakliga nackdelarna med mekaniska mätare jämfört med de statiska har hittills varit känslighet för överbelastning, sämre noggrannhet vid låga laster och kortare utesittningstider. Den stora fördelen har varit låga priser. Utveckling har på senare tid medfört att både livslängden och signalöverföringen mellan mätare och integreringsverk har förbättrats. Fortfarande är dock noggrannheten hos mekaniska mätare påtagligt beroende av belastningen. De statiska flödesmätare aktuella vid energimätning i fjärrvärmeapplikationer är huvudsakligen av den magnetiskt-induktiva typen (*MI*) och av ultraljudtypen. Deras stora fördel är, ständigt ökande, hållbarhet och noggrannhet. I Sverige har man i tidigt skede intresserat sig för *MI*-mätarna inom fjärrvärmebranschen medan ultraljudsmätare, tills nyligen, marknadsfördes svagt. På kontinenten däremot har man varit avvaktande mot statiska mätare till att börja med och efter deras genombrott tagit fasta på att ultraljudsmätare anses vara mindre känsliga för magnetitförsmutsning än *MI*-mätare. Som följd härav är andelen *MI*-mätare i fjärrvärmeapplikationer i Sverige betydligt större än andelen ultraljudsmätare, medan förhållandet är omvänt i t ex Danmark och Tyskland (Svensson 1996, AGFW International Symposium 1997).

3.2 Den nya normnomenklaturen

Statiska mätare kan arbeta utan begränsningar inom hela sitt arbetsområde och, beroende på konstruktionen, kan dessutom med bibehållen noggrannhet överbelastas med 10-100% över det specificerade högsta flödet. Vid revidering av värmemätarstandarden EN 1434 hade man tagit intryck av den tekniska utvecklingen inom flödesmätning och modifierade standardenden, för c:a ett år sedan, så att den numera bättre avspeglar de statiska flödesmätarnas egenskaper. Således har bl a den gamla beteckningen Q_n blivit ersatt av Q_p, där index ”p” står för ”permanent”. För en statisk mätare innebär förändringen att $Q_p = Q_{max}$ om inte tryckfallet över mätaren vid Q_{max} överskrider 25 kPa. I det senare fallet blir $Q_p < Q_{max}$ och lika med det flöde vid vilket tryckfallet blir 25 kPa. Beteckningarna Q_{min} och Q_{max} har ändrats till Q_i respektive Q_s men deras innebörd är samma som tidigare. För övrigt skall det lägsta flödet då mätaren fortfarande registrerar ett värde större än noll också specificeras, medan beteckningen Q_t har utgått (se SS-EN 1434, 1997).

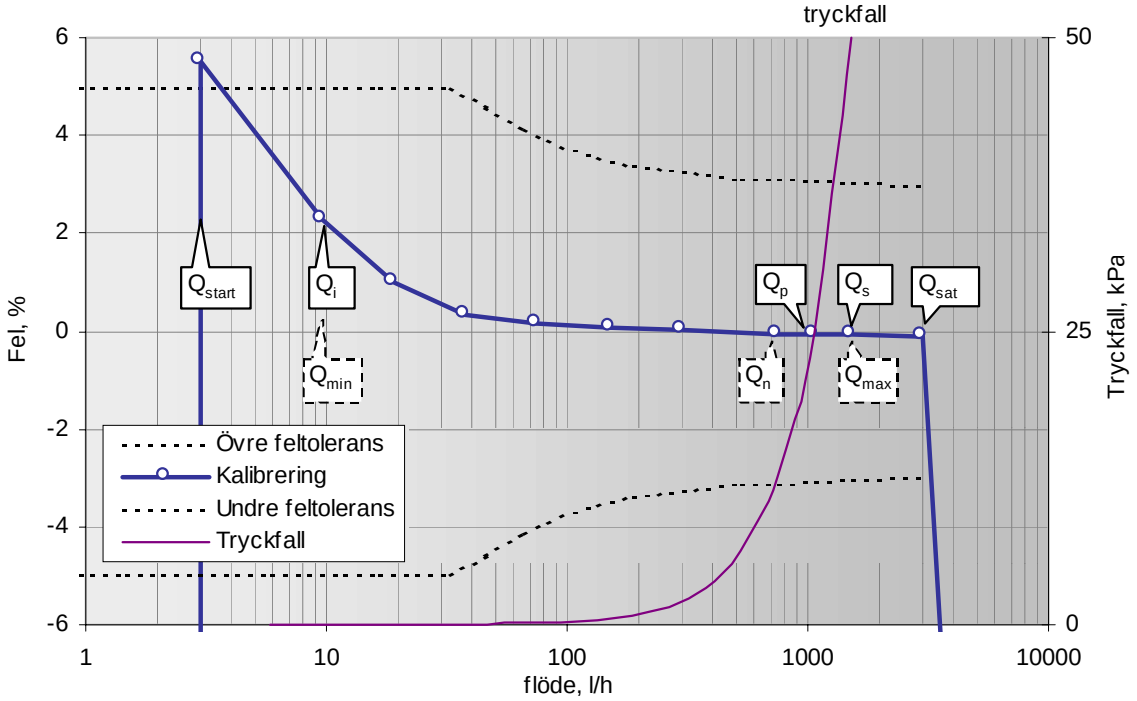
Figur 2 visar en typisk kalibreringskurva för en flödesmätare med både gamla och nya beteckningar. Den exemplifierade mätaren har tryckfall som är något högre än 25 kPa vid Q_s varför Q_p är mindre än Q_s. Man kan även se att mätaren inte registrerar något flöde under Q_{start} (mätfel: -100%) och att mätfelet ökar snabbt om Q_{sat} överskrids (mätfel: $100\text{-}Q_{sat}/Q*100\%$). Att felet är litet vid höga mätvärden och ökar när mätvärdet sjunker mot Q_i är typiskt.

3.3 Mätnoggrannheten

Flödesmätartillverkare lägger ner stor möda på att kompensera bort mätfel så att noggrannheten är hög inom ett så brett arbetsområde som möjligt. Kalibreringskurvan ändras dock under driften. Utifrån kontrollmätningar utförda i samband med utbyte av mätare som varit i drift under en föreskriven period, kan man konstatera att de största förändringarna vanligen inträffar inom kurvans låglastområde. Exempel på detta kommer att presenteras längre fram.

Den enkla kalibreringskurvan beskriver enbart mätarens genomsnittliga noggrannhet vid stationär last. Det finns ytterligare inbyggda parametrar som kan påverka mätresultatet såsom

- mätarens repeterbarhet



Figur 2 Kalibreringskurva för en genomsnittlig statisk flödesmätare. Beteckningar:

Q_{start} – det lägsta mätbara flödet (ospecificerad noggrannhet)
Q_i – det lägsta flödet då den högsta tillåtna onoggrannheten är specificerad (tidigare Q_{min})
Q_p – det största flödet då mätaren kan arbeta kontinuerligt och då tryckfallet är högst 25 kPa
Q_s – det största flödet då den högsta tillåtna onoggrannheten är specificerad (tidigare Q_{max})
Q_{sat} – det största mätbara flödet (ospecificerad noggrannhet)
Q_n – $0{,}5Q_{max}$ (gammal beteckning)

- mätarens samplingsfrekvens
- mätarens dynamik (tidskonstant)

Under förutsättning att repeterbarheten är rimligt god (normalt ligger avvikelsen under c:a 0.5%) har den, tack vare utjämningseffekten, ingen större betydelse för slutresultatet vid långtidsmätningar. Dagens statiska mätare arbetar internt med samplingsfrekvenser långt under en sekund och det momentana värdet utgör ofta ett medelvärde av en sekvens av mätningar. En typisk medelvärdesbildningsfrekvens är 0.5-2 sekunder. Mätarens tidsfördröjning är då av samma paritet som medelvärdesbildningsfrekvensen. I vissa mätare kan tidsfördröjningen vara justerbar (ökningsbar) vilket kan vara önskvärt om flödessignalen används som ingångsvärde till en regulator. Denna facilitet används dock ej vid energimätning.

Vid fortsatt analys förutsätts här att enbart flödesmätarens kalibreringskurva samt belastningens karaktär på ett signifikant sätt påverkar det slutliga mätresultatet, varför inflytande av parametrar som diskuterats ovan negligeras.

4 Simulering av förbrukning av fjärrvärmevatten

Som redan nämnts beror den sammanlagda fjärrvärmevattenförbrukningen dels på uppvärmning av hus och dels på uppvärmning av tappvarmvatten. En högre eller lägre förbrukning beror bl a på fjärrvärmenätets temperaturprogram samt dimensionering och driftval av de till fjärrvärmecentralen anslutna kretsarna.
De vid simulering använda dimensioneringsalternativen visas i tabell 1 och 2 samt i figur 3.

Fjärrvärmevattnets framledningstemp. t_{DUT}/t_{sommar}, °C	Radiatorkretsens dimensionering, t_{fram}/t_{retur}, °C	Tappvarmvattenkretsens dimensionering, t_{kallv}/t_{varmv}, °C
115/75	80/60	10/55
105/65	60/45	10/55

Tabell 1 Dimensionerande temperaturprogram för simuleringsmodellen

4.1 Radiator- och husmodellen

För att fånga upp inflytandet av husets dynamik på fjärrvärmecentralens beteende används en dynamisk modell av ett hus med radiatorsystem. Modellen har beskrivits i detalj av Winberg (1992) och använts även av bl a Näslund (1997). Den tar på ett enkelt sätt hänsyn till byggnadens volym och termiska massa, befintlig ventilation och radiatorsystemets storlek. Figur 4 visar den schematiska uppbyggnaden av modellen medan tabell 2 redovisar bl a den använda dimensioneringen av radiatorerna för olika husstorlekar. Vid simulering antas att den genomsnittliga inomhustemperaturen är 20°C. Framledningstemperaturen i radiatorkretsen varierar beroende på utomhustemperaturen, se figur 3, och sänks med 10°C nattetid d v s mellan kl 23.00-05.30.

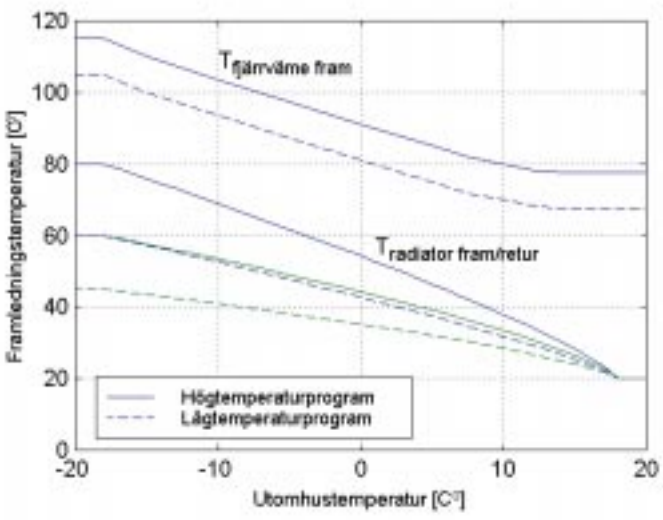
	Dimensionering av radiatorer [kW]	Dimensionerande tappvarmvattenflöde [m^3/h]	[l/s]
Villa	15	0.94	0.26*)
20 lgh	100	1.98	0.56
100 lgh	500	4.54	1.26

Tabell 2 Dimensionering av radiatorkrets och tappvarmvattenförbrukning.

*) Medan arbetet pågick sänktes det av Svenska Fjärrvärmeföreningen rekommenderade värdet från **0.26** till **0.2 l/s**

4.2 Tappvarmvattenförbrukning

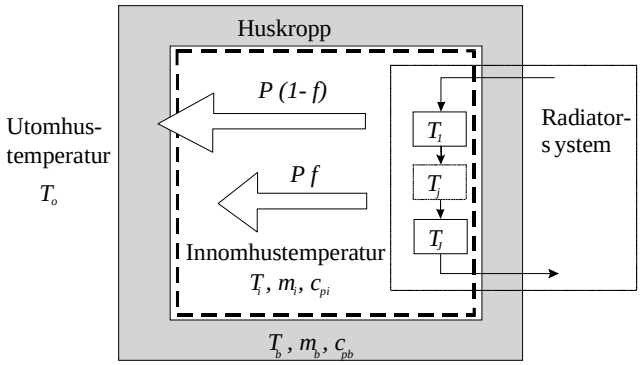
Förbrukningen av tappvarmvatten i bostadshus är starkt beroende av brukarvanor hos de boende. En simuleringsmodell framtagen av Holmer (1987) och vidareutvecklad av Gummérus (1989) samt Arvastsson och Wollerstrand (1997) används här för att ta fram ett belastningsmönster som tar hänsyn till tappvattenförbrukningens stokastiska karaktär och dess sammanlagring i olika stora hus. Figur 6 visar exempel på simulerad dygnsvariation av tappvarmvattenförbrukning i en villa och i ett bostadshus om 20 resp 100 lägenheter.



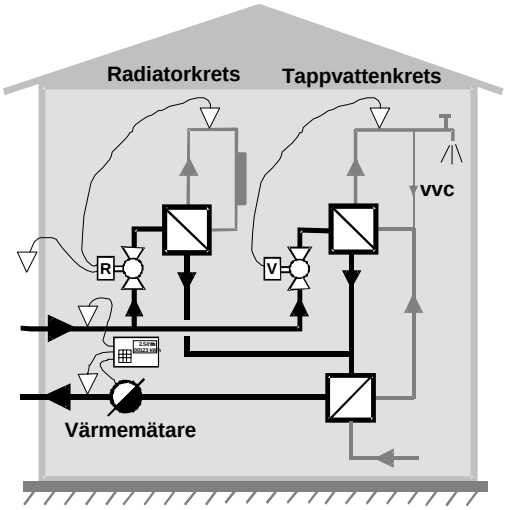
Figur 3 Temperaturprogram för fjärrvärme- och radiatorframledning

4.3 Fjärrvärmecentralmodellen

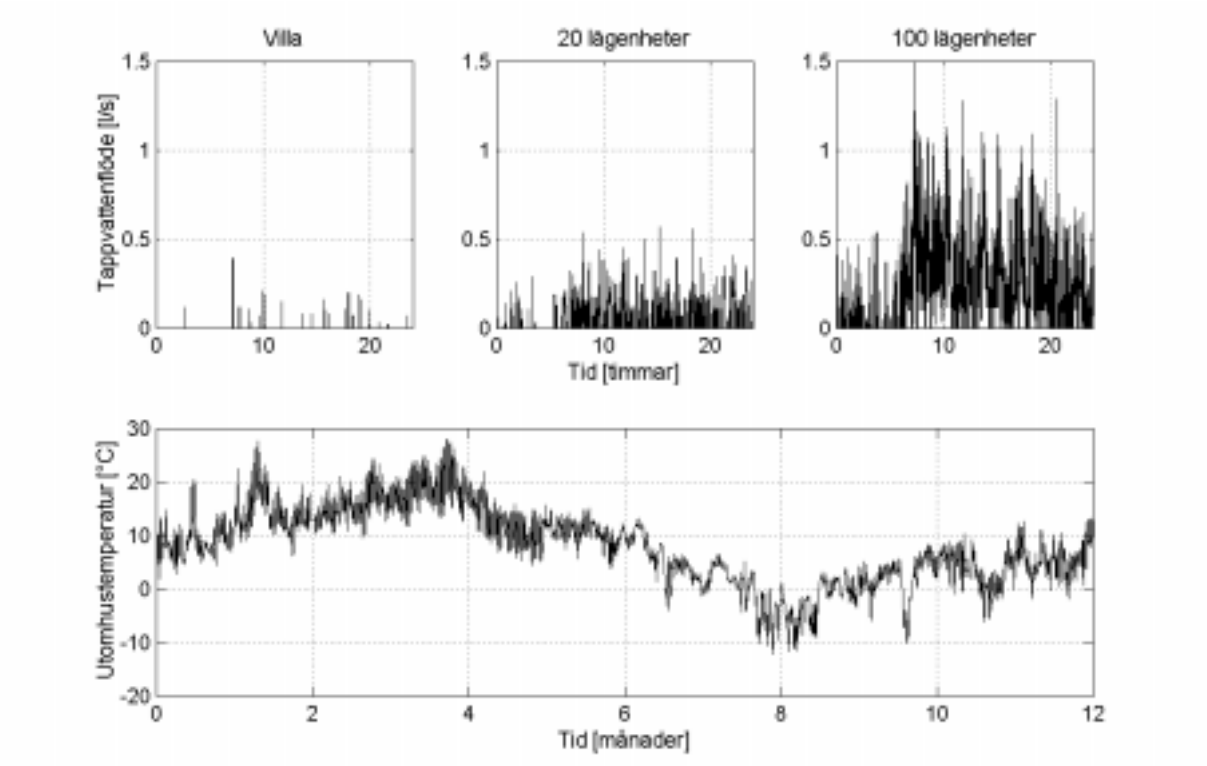
Dynamisk simulering av termiska system som huvudsakligen består av värmeväxlare, reglerutrustning och armatur kan numera utföras med hjälp av ett flertal simuleringspaket. Här har Matlab/Simulink använts för simulering på grund av detta verktygs flexibilitet. Modellen som används var ursprungligen utvecklad av författaren för att undersöka dynamik hos genomströmningsberedare för tappvatten i parallell- och/eller 2-stegskopplad fjärrvärmecentral. Modellen anpassades till långtidssimulering av Ingimundarson (1998). Standard 2-stegskopplad fjärrvärmecentral med plattvärmeväxlare, PI-regulatorer, likprocentiga reglerventiler och VVC-krets simuleras för bostadshus och en parallellkopplad central med självverkande ventil typ Danfoss AVTQ i tappvarmvattenkretsen som är utan VVC simuleras för en villa. En kopplingsschema för en 2-stegskopplad fjärrvärmecentral visas i figur 5.



Figur 4 Schematisk bild av husmodellen



Figur 5 2-stegskopplad fjärrvärmecentral

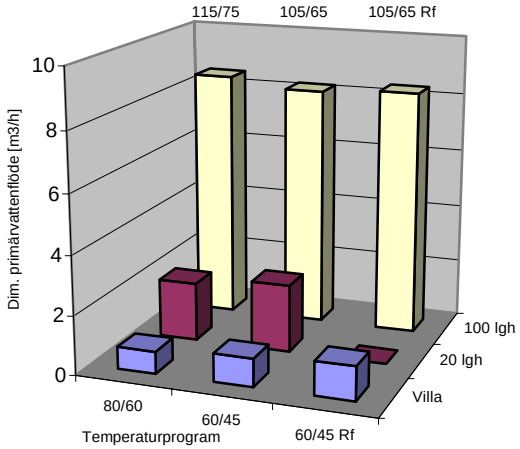


Figur 6 Simulerad dygnsvariation av tappvarmvattenförbrukning i en villa och i ett bostadshus om 20 resp 100 lägenheter, samt utomhustemperatur uppmätt i Malmö under tiden april 96 – mars 97.

4.4 Resultat av simulering

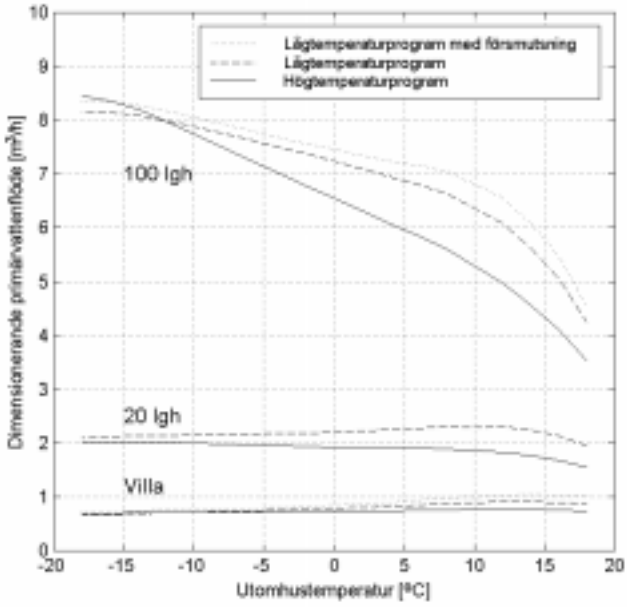
Dynamisk simulering med hög tidsupplösning och under lång tidsperiod är tidskrävande. Således har det tagit c:a 1 vecka datortid att simulera drift av en fjärrvärmecentral i en byggnad under ett år. Sex simuleringar krävdes för att täcka dimensioneringsfall angivna i tabell 1 och 2. Simuleringar med radiatordimensionering 80/60 kallas i fortsättningen högtemperaturfall, medan simuleringar med radiatordimensionering 60/45 kallas lågtemperaturfall. Lågtemperaturfallen kompletterades efteråt med ytterligare 2 simuleringar där försmutsningsfaktor (R_f=0.1 m^2K/kW) har använts i värmeväxlarmodellerna för en villa och för bostadshuset med 100 lägenheter. Sammanställning av de simulerade fallen och det beräknade momentant högst möjliga fjärrvärmevattenflödet visas i diagram i figur 7 och 8. Diagrammen visar det största flödet som hade inträffat i respektive fall om både radiator- och tappvarmvattenkretsen i fjärrvärmecentralen utsattes för dimensionerande last.

Vid jämförelse mellan de olika fallen kan allmänt sägas att skillnaden mellan hög- och lågtemperaturfallet i primärflödets förbrukning inte är speciellt stor här. Detta kan förklaras med att, vid övergång från hög- till lågtemperaturfallet, har temperaturprogrammen ändrats i samma riktning (sänkts) för både fjärrvärmeframledning och radiator-fram- och –returledning, varför avkylningen och förbrukningen av primärvattnet har förblivit ungefär densamma. Hade man jämfört två lika stora fjärrvärmecentraler som båda arbetar i ett högtemperaturnät och betjänar ett högtemperatur- respektive ett lågtemperaturradiatorsystem, då hade primärflödets avkylning varit högre för det senare systemet i alla driftsfall.



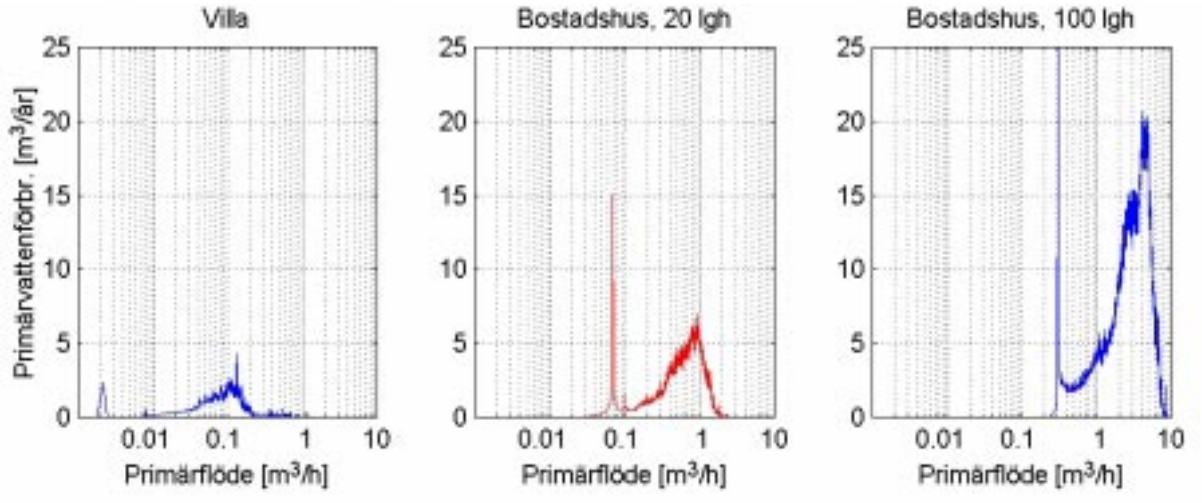
Figur 7 Dimensionerande fjärrvärmevattenflöde för alla de simulerade fallen

Stora mängder utdata har genererats vid helårssimuleringarna trots att bara fjärrvärmevattenflöde och avkylning registrerats var femte sekund. Ett sätt att reducera datamängden är att omvandla en tidskontinuerlig registrering till ett frekvensdiagram där man anger hur ofta ett viss flöde har förekommit under det aktuella tidsintervallet (här: ett år).



Figur 8 Beräknat maximalt möjligt fjärrvärmevattenflöde s f a utomhustemperaturen

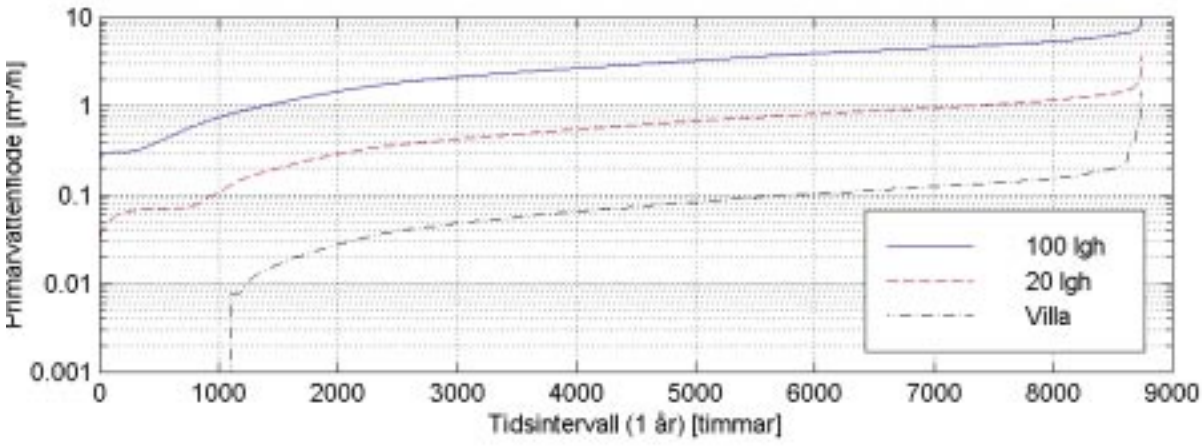
Diagrammet i figur 9 visar de simulerade fjärrvärmevattenflödena för högtemperaturfallet som frekvenskurvor. Frekvenskurvornas beroende av byggnadens storlek är stort. Detta beror på den tidigare nämnda sammanlagringseffekten i tappvarmvattenkretsen. I en villa är fjärrvärmevattenförbrukning relaterad till tappvarmvattenberedning dominerande om det gäller flödestoppar upp till 1 m^3/h. Flöden relaterade till husuppvärmning är däremot av storleksordningen 0.04-0.2



Figur 9 Frekvenskurvor för fjärrvärmevattenförbrukning i bostadshus under ett år. Högtemperaturfallet.

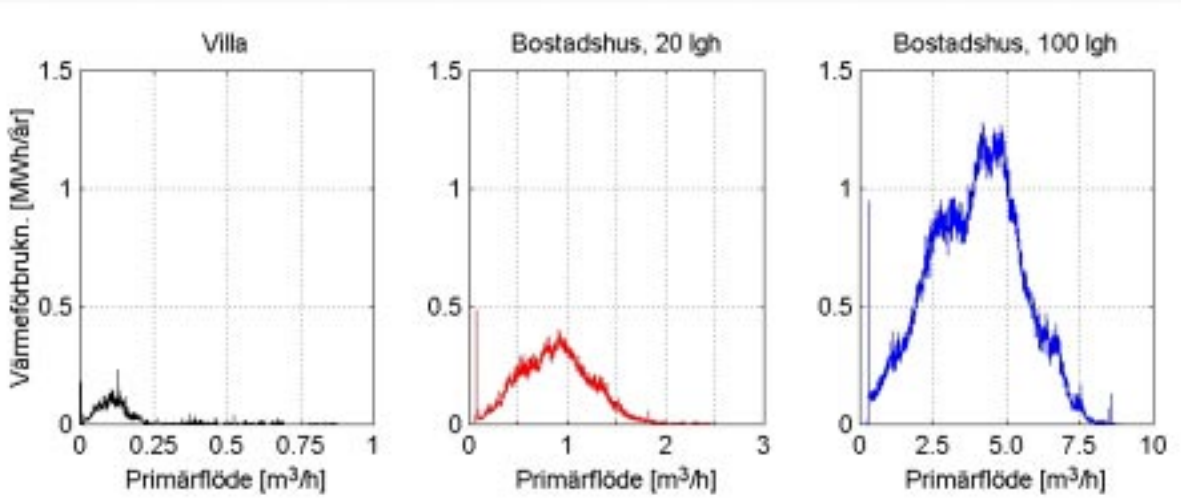
m^3/h. Totalt sett krävs det en flödesmätare med arbetsområde drygt 1:200 om alla flöden som kan förekomma i en villacentral skall kunna registreras.

Förbrukningsmönstret är annorlunda i flerbostadshus. Att centralen är 2-stegskopplad har här sin stora betydelse vid de största belastningarna (mest vintertid) då förvärmaren i tappvarmvattenkretsen effektivt minskar eftervärmarens förbrukning av primärvatten. Inflytandet av tappvattenrelaterade flöden på den totala förbrukningen minskar dessutom betydligt på grund av sammanlagringseffekten. En annan skillnad jämfört med villafallet är att primärflödet här inte kan bli lägre än vad som krävs för att kompensera värmeförluster i VVC-kretsen. Dessa flöden förekommer mest nattetid då radiatorkretsen inte är i funktion, och representeras av en hög spik till vänster i diagrammen för 20 respektive 100-lägenhetshus. Radiatorlastrelaterade flöden däremot, med en med växande antalet lägenheter minskande överlagring av tappvattenrelaterade flöden, ger upphov till de högsta värdena. Variationsområde för primärflödesförbrukning kan uppskattas till c:a 0.05-3 m^3/h (1:60) för 20-lägenhetshus och 0.3-10 m^3/h (1:33) för 100-lägenhetshus. Man kan följaktligen konstatera att vid flödesmätning i flerbostadshus kan mätare ha betydligt mindre arbetsområde än vad som är fallet i småhus. Figur 10 visar en sammanställning av frekvenskurvorna i ett och samma varaktighetsdiagram. Man ser tydligt hur flödets totala variationsområde samt förhållandet mellan det absolut största flödet och det största ofta förekommande flödet (längst till höger i diagrammet) minskar med ökande antalet



Figur 10 Varaktighetsdiagram av fjärrvärmevattenförbrukning i bostadshus under ett år. Högtemperaturfallet.

lägenheter. Man ser även att det i en villacentral finns perioder då flödet är nära noll. Flödet avstannar dock inte alltid helt, beroende på ett minimalt läckage, i storleksordningen 0.05-0.1% av reglerventilens k_{vs}-värde, som kan uppstå vid stängd ventil beroende på tillverkningstoleranser (illustreras av en triangelformad spik längst till vänster i figur 9, villa).



Figur 11 Frekvenskurvor för värmeförbrukning i bostadshus under ett år. Högtemperaturfallet.

För att beräkna den i fjärrvärmecentralen förbrukade fjärrvärmevattenvolymen och värmemängden under en viss period kan man i praktiken använda formlerna

$$V_{period} = \sum_{0}^{t_{period}} \overline{V}\, t_{sampling} \qquad \text{respektive} \quad E_{period} = \sum_{0}^{t_{period}} \overline{V} \rho\, c_p \Delta T\, t_{sampling}$$

som, för små samplingsintervall med god noggrannhet motsvarar de exakta formlerna,

$$V_{period} = \int_{0}^{t_{period}} \dot{V}\, dt \qquad \text{respektive} \quad E_{period} = \int_{0}^{t_{period}} \dot{V} \rho\, c_p \Delta T\, dt$$

. Av formlerna framgår att om uttrycket $\rho c_p \Delta T$ vore konstant då skulle V_{period} och E_{period} vara proportionella mot varandra. Uttryckets variation bestäms huvudsakligen av avkylningen ΔT som för en korrekt dimensionerad fjärrvärmecentral håller sig inom ca 40-60°C beroende på centralens driftläge. Av detta framgår att frekvenskurvor för primärflödesförbrukning respektive värmeförbrukning i en central borde ha snarlik karaktär och att så är fallet, kan ses i figur 11. Det bör observeras att i figur 9 är abskissan logaritmisk för att exponera kurvornas karaktär vid små flöden, medan i figur 11 är abskissan linjär, vilket låter oss bättre se hur förhållandet mellan de absolut största flödena och de största ofta förekommande flöden minskar då antalet lägenheter ökar.

4.5 Inflytande av mätarens arbetsområde på energimätning

Det har redan sagts att primärflödesbehovets karaktär är annorlunda i en villacentral jämfört med en bostadshuscentral. Eftersom flödets variationsområde i en bostadshuscentral enligt simuleringsresultaten är högst 1:60, kan man konstatera att ur arbetsområdets synvinkel kan alla flödesmätare som är godkända för värmemätning användas där. Situationen är annorlunda i en villa varför det finns anledning att undersöka mätsituationen i en villacentral ytterligare. Figur 12 visar ett diagram med ackumulerad värmeförbrukning på abskissan och primärvattenflöde på ordinatan. Diagrammet är utfört i dubbellogaritmisk skala för att tydligt visa hur mycket energi som förbrukas vid låga primärflöden. Med hjälp av kurvorna i diagrammet

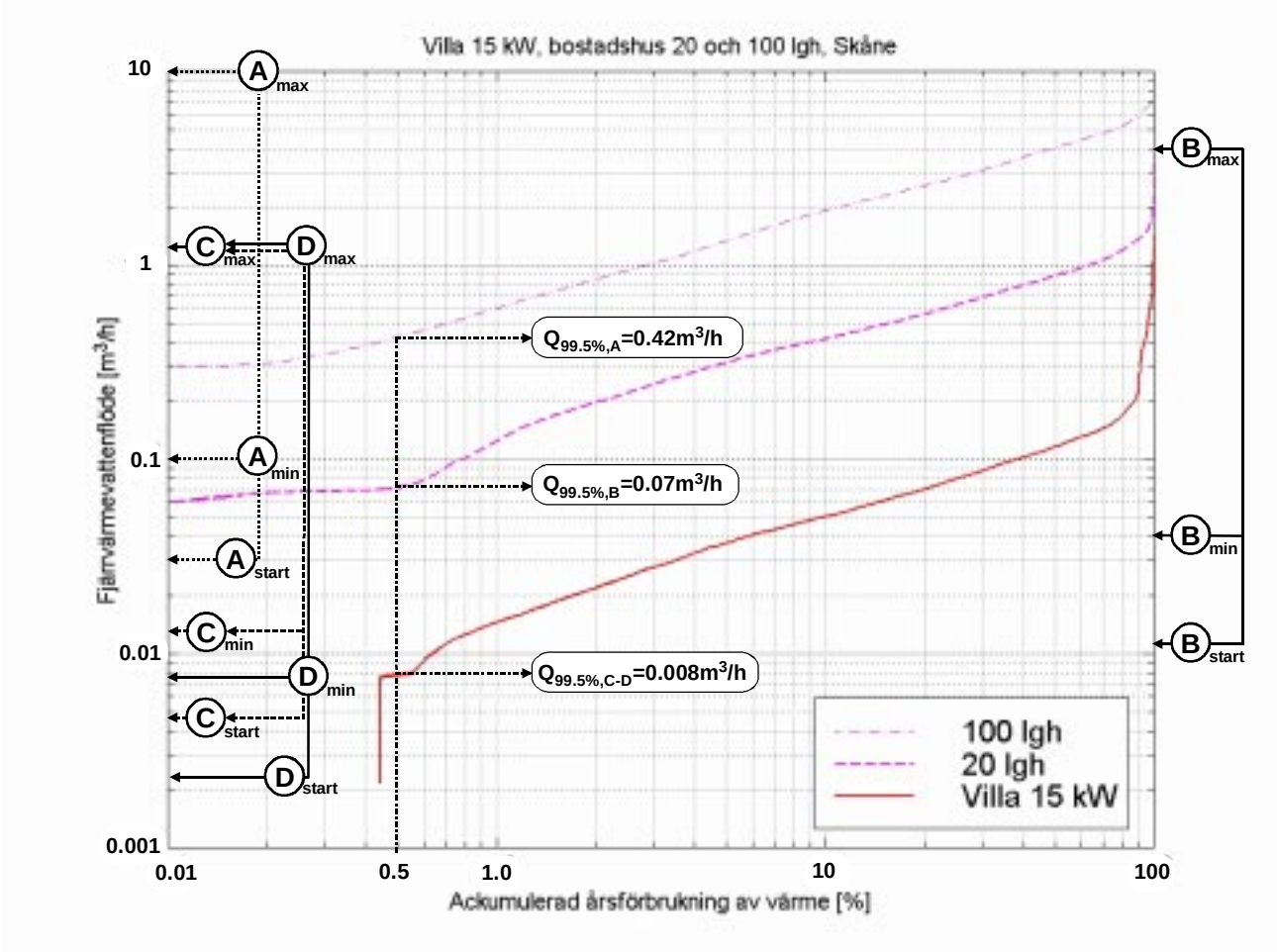
kan man avläsa hur stor del av den i en fjärrvärmecentral förbrukade värmemängden som kan registreras med garanterad noggrannhet beroende på flödesmätarens arbetsområde. Låt oss anta att vi använder mätare A-D, såsom specifierats i tabell 3, för uppgiften och låt oss anta att mätarnas hela arbetsområde kan användas, d v s att $Q_p=Q_s$.

	$\sim Q_{start}$, m^3/h	Q_i (Q_{min}), m^3/h	Q_s (Q_{max}), m^3/h	Arbetsområde
Mätare A	0.03	0.10	10	1:100
Mätare B	0.015	0.05	5	1:100
Mätare C	0.0045	0.015	1.5	1:100
Mätare D	0.00225	0.0075	1.5	1:200

Tabell 3 Exempel på mätare med olika dimensionering och arbetsområde

Genom avläsning i diagrammet kan konstateras att mätare A och mätare B med god marginal täcker 100% av primärflöden som förekommer vid värmeförbrukning i bostadshus med 100 respektive 20 lägenheter. Mätare C, som jämte mätare D skall registrera flödesförbrukningen i en villa, visar sig ha något för snävt arbetsområde eftersom 1% av värmeförbrukning kommer att ske vid primärflöde lägre än Q_i (Q_{min}), medan för mätare D motsvarande tal blir strax under 0.5%. Detta innebär att om respektive mätare inte registrerade alls något flöde lägre än Q_i då hade mätfelet orsakat av detta på årsbasis blivit –1.0 respektive -0.5% . Alla statiska mätare i den aktuella storleksklassen klarar dock registrering av flöde ner till ca 0.2-0.3 av Q_i (även om mätfelet då kan bli något större än de normenliga ±5%). Med hänsyn tagen till detta kan man konstatera att om exempelvis 1% av årsförbrukningen av värme skulle mätas med 10% fel, vilket i och för sig torde vara ett pessimistiskt antagande, så skulle det totala mätfelet påverkas med 0.1% vilket är försumbart.

Ett annat sätt att fastställa det önskvärda lägsta mätbara flödet i värmemätarens flödesmätare är att i figur 12 avläsa det lägsta flödet som behöver registreras om 99.5% av årsförbrukningen av värme skall registreras. Det avlästa flödet, betecknat $Q_{99,5\%}$, återfinns i tabell 4.



Figur 12 Simulerad fjärrvärmevattenflöde som funktion av ackumulerad årsförbrukning av värme i en villa och i ett bostadshus om 20 resp 100 lägenheter.

	Q_i (Q_{min}) m^3/h	$Q_{99,5\%}$ m^3/h	Q_s (Q_{max}) m^3/h	Arbetsområde	Variations-område 99.5%
Mätare A	0.10	0.42	10	1:100	1:24
Mätare B	0.04	0.07	4	1:100	1:57
Mätare C	0.015	0.008	1.5	1:100	1:188
Mätare D	0.0075	0.008	1.5	1:200	1:188

Tabell 4 Jämförelse mellan arbetsområde och lastvariationsområde för mätare A–D enligt figur 12.

Man bör komma ihåg att resonemanget ovan å ena sidan inte tar hänsyn till mätarens onoggrannhet, å andra sidan försummar det faktum att mätaren oftast kan överbelastas (förutsatt att $Q_p \approx Q_s$).

Sammanfattningsvis kan man säga att analys av primärflödets årliga frekvenskurva för olika husstorlekar pekar på att det behövs flödesmätare med större arbetsområde i småhus jämfört med flerbostadshus. En noggrann mätare med arbetsområde 1:200 är tillräckligt känslig för att registrera de flesta flöden som förekommer i en villacentral. Eventuella extrema flödestoppar som är större än en sådan mätares arbetsområde inträffar bara sporadiskt. En flödesmätare med arbetsområde 1:100 är helt tillräcklig för värmemätning i flerbostadshus. Inflytandet av flödesmätarens felkurva på noggrannheten i värmedebitering kommer att undersökas i följande kapitel.

5 Inflytande av valet av mätare av olika typ och storlek

5.1 Allmänt

För att undersöka hur energimätarens debiteringsnoggrannhet påverkas av en viss flödesmätare måste man undersöka inflytandet av dess mätfel, karakteriserad av dess kalibreringskurva, vid olika typer av belastning. I detta kapitel kommer följande tre olika typer av kalibreringskurvor att analyseras:

- Syntetiska kurvor av olika karaktär
- Kurvor för nya mätare testade i provrigg
- Kurvor för mätare som använts under 2-5 år testade i provrigg

För att undersöka hur valet av mätare av olika storlek påverkar debiteringsnoggrannheten förutsätter man att en kalibreringskurva som gäller för en viss mätarstorlek, efter en proportionell omskalning, kan gälla för mätare av samma typ men med annan storlek. Detta är inte riktigt korrekt eftersom det förekommer en ganska stor variation mellan kalibreringskurvornas form hos olika stora mätare även om de är av samma fabrikat. Dessutom tenderar mindre mätare att ha större arbetsområde än de stora mätarna. Å andra sidan är något annat sätt att genomföra undersökningen på inte realistiskt, eftersom alla de mätarstorlekar som man behöver ta hänsyn till här inte finns i verkligheten.

En annan aspekt är att flödesmätare ständigt modifieras och, oftast, förbättras varför undersökningens generella värde skulle minska om den kopplades alltför kraftigt till befintliga mätare. Således är målet här att komma fram till vilken kalibreringskurva som är att föredra, om man funderar på att skaffa en ny mätare, och hur pass viktigt det är att mätarens storlek är exakt anpassad till de förväntade belastningar som skall registreras. Observera därför att resultatkurvor i figur 14-16, 19-21 och 23-25 längre fram är plottade som funktion av mätarstorlek.

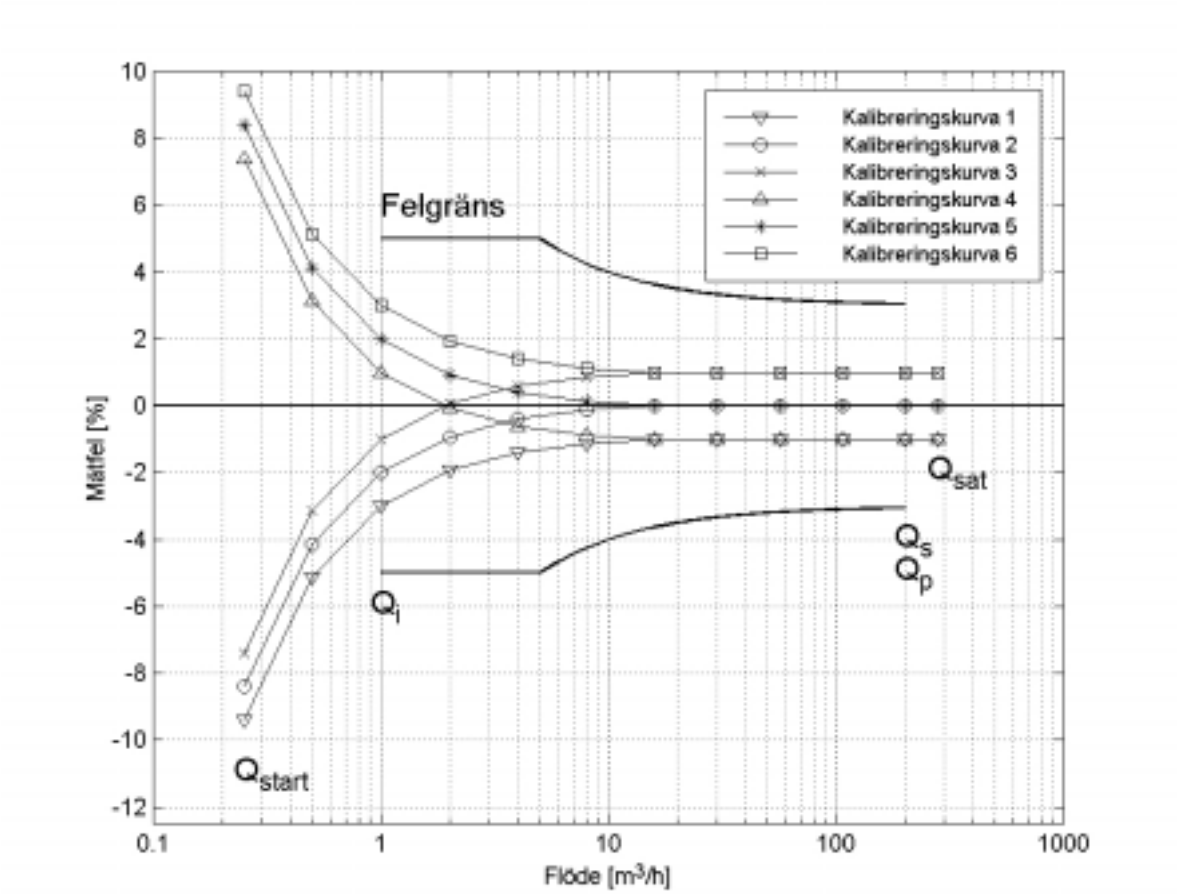
Felet i debitering beräknas som skillnaden mellan den simulerade och den uppmätta förbrukningen beräknad med formlerna i avsnitt 4.4 och anges normalt som absolutvärde i procent. Vid analys av de begagnade mätarna gäller ett något annorlunda beräkningssätt som anges längre fram.

5.2 Syntetiska kalibreringskurvor

För att undersöka inflytande av renodlad parametervariation på debiteringens noggrannhet gjordes följande antagande (jmf figur 13)

- noggrannheten är konstant inom flödesområdet $0.1Q_s$–Q_s
- noggrannheten ökar alternativt minskar med 2% inom flödesområdet Q_i–$0.1Q_s$ enligt samma trend som den övre felgränskurvan
- det lägsta registreringsbara flödet är $Q_{start}=0.25Q_i$; flöden under Q_{start} registreras inte
- det högsta registreringsbara flödet är $Q_{sat}=1.4Q_s$; flöden större än Q_{sat} registreras som Q_{sat}.

I figur 13 visas den gjorda parametervariationen. Kalibreringskurvorna 2 och 5 är baskurvor med mätfel 0% vid större belastningar, med den skillnaden att felet är negativt vid små belastningar för kurva nr 2 och positivt för kurva nr 5. Kurvorna 1 och 3 samt 4 och 6 är parallellförskjutna med ±1%, respektive i förhållande till sina baskurvor. Uppsättningen skall visa om någon typ av kalibreringskurva är att föredra i debiteringsmätare i fjärrvärmecentraler. Undersökningen genomfördes enligt tidigare beskriven metodik. Resultat i form av debiteringsfel som funktion av mätarstorlek (uttryckt som Q_s) och med resp. kalibreringskurvas nummer som parameter visas i figur 14-16.



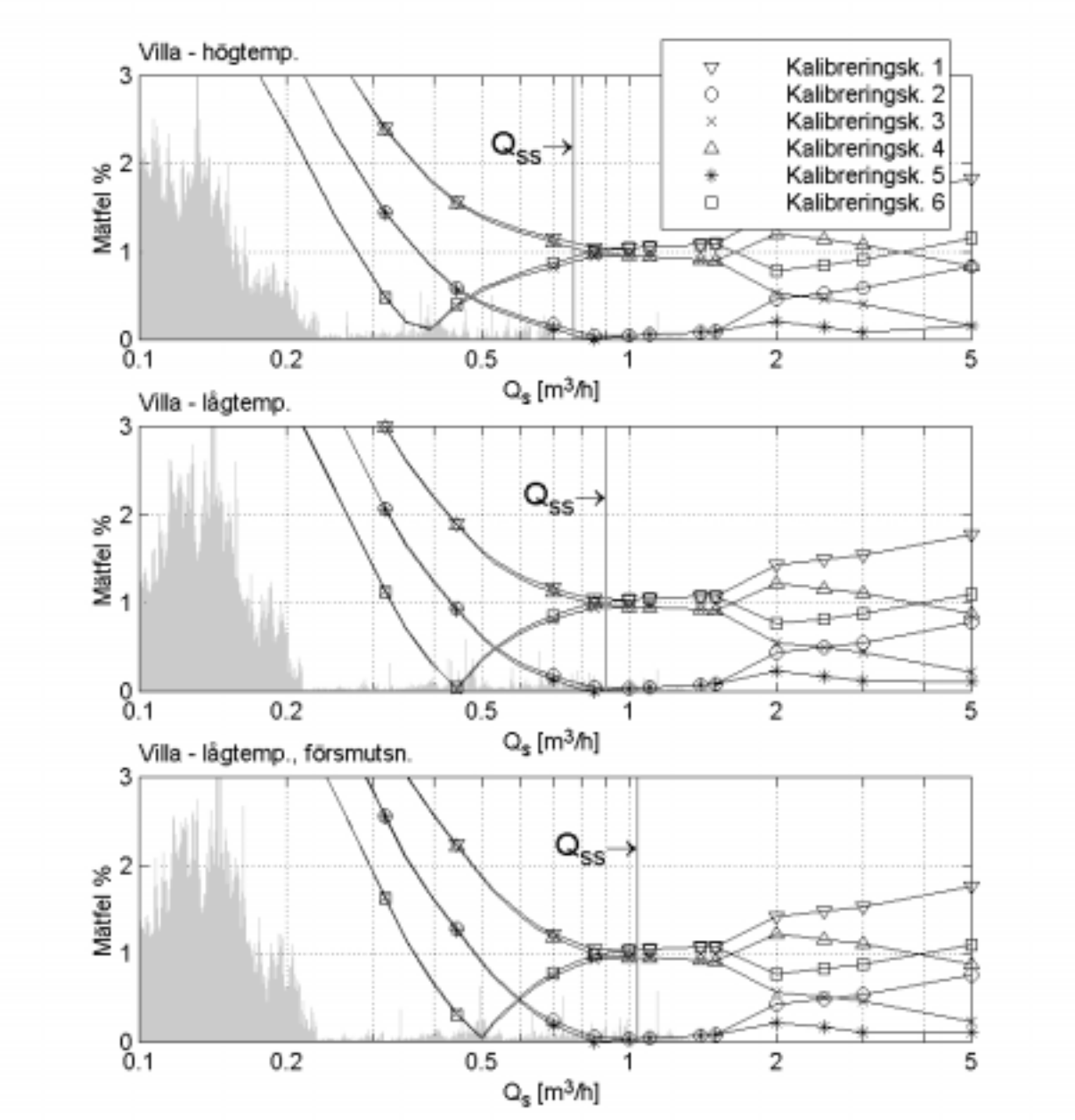
Figur 13 Syntetiska kalibreringskurvor för en flödesmätare

Figur 14 visar resultat av simulering av värmeförbrukning i en villa. Abskissan är mätarstorleken, karakteriserad av Q_s-värdet. Det gråskuggade fältet till vänster i respektive deldiagram illustrerar fördelningen av primärvattenflödesförbrukningen i husets fjärrvärmecentral. Jämförelse mellan det gråa fältets utsträckning och en viss mätarstorlek resulterar i en uppfattning om hur ofta flödesförbrukningarna blir större än mätaren är dimensionerad för. Ett vertikalt streck markerat Q_{ss} anger det största primärflöde som med låg sannolikhet överskrids i ifrågavarande central (se avsnitt 4.4, figur 8). Kurvorna visar att mätare 2 och 5 är att föredra vilket man kunde förutspå. Väljer man en lagom stor mätare mäts flödet oftast inom det området där mätarens noggrannhet är hög.

Då felkurvorna sjunker mot noll är mätare 5 obetydligt bättre eftersom dess positiva mätfel vid låga flöden i vissa lägen kompenserar för driftlägen med överbelastning och med negativt fel. Mätare 3 och 6 ger dålig noggrannhet förutom ett fall där de väljs väsentligt för små, Q_s=0.4-0.5 m^3/h. Detta är ett specialfall där det annars mest positiva felet som kurvorna 3 och 6 uppvisar kompenseras av att mätaren är för liten och registrerar de största förekommande flödena med ett stort negativt fel eller inte registrerar dem alls.

Självfallet är detta minimum väldigt känsligt för både den exakta karaktären hos fördelningen av primärvattenflödesförbrukningen och för flödesmätarens verkliga egenskaper och skall inte beaktas vid val av lämplig flödesmätarstorlek. Det lämpliga generella valet är istället mätare med Q_s=0.9-1.5 m^3/h. Mätare nr 5 kan dock väljas betydligt större, upp till Q_s=5.0 m^3/h. Detta beror helt och hållet på dels mätarens höga noggrannhet vid de högre flödena, dels på att mätarens fel är positivt vid de lägsta flödena och har följande förklaring:

I en överdimensionerad mätare förskjuts fördelningen av flödesförbrukningarna mot det lägsta arbetsområdet och större delen av flödena kommer att registreras där. Som en följd av detta kommer en, jämfört med en korrekt dimensionerad mätare, större mängd flöden inte att registreras alls. I den situationen registrerar en mätare av typ 5 inte längre vissa små flöden (innebär –100% mätfel) men ”i gengäld” registrerar den en relativt större mängd av låga flöden med ett positivt fel (mellan 0 och +5%). Detta resulterar i att felen tar ut varandra. Motsvarande situation kan inte inträffa i mätare typ 2’s fall eftersom dess mätfel vid låga flöden är negativt. Följaktligen ökar mätarens debiteringsfel successivt för mätarstorlekar till höger om området 0.9-1.5 m^3/h.



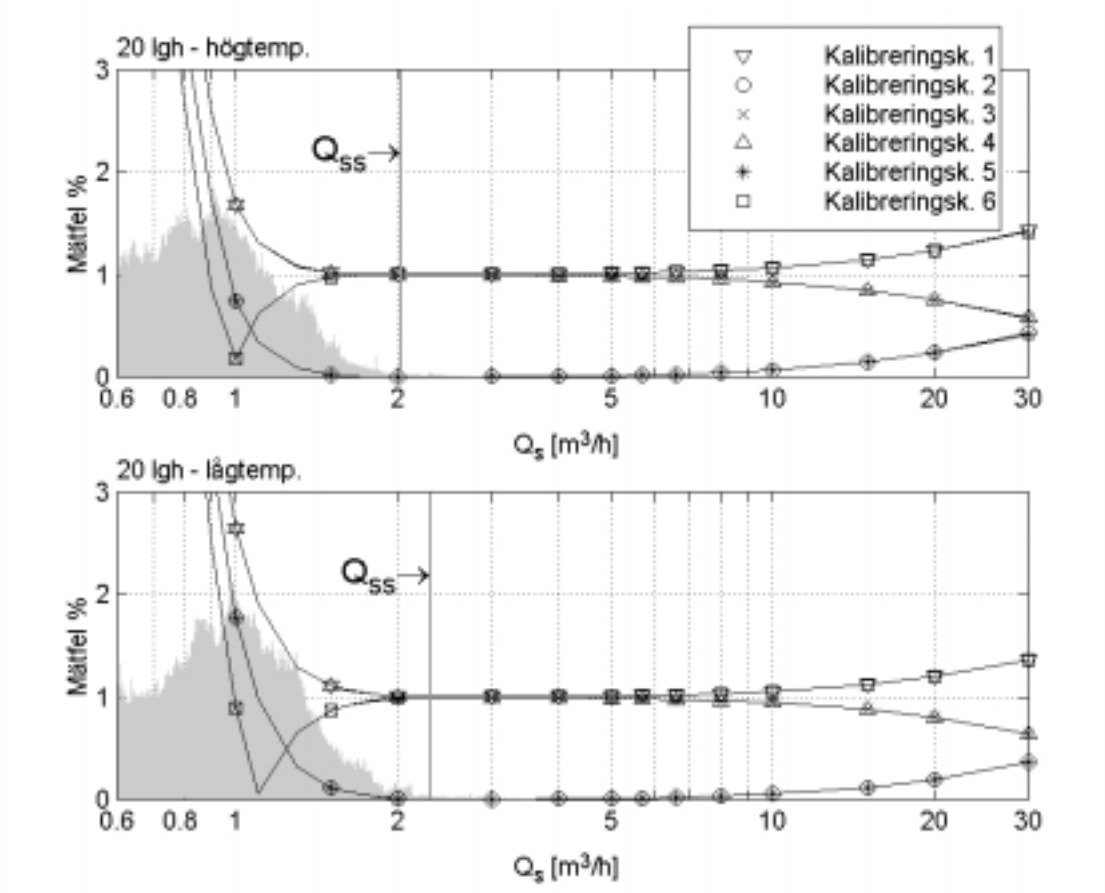
Figur 14 Fel i värmedebitering för ett års förbrukning i en villa (absolutvärden) som funktion av mätarstorlek. Fall med hög- och lågtemperatursystem samt med ett lågtemperatursystem med försmutsade värmeväxlare visas.

Observera att mätare av typ 4 delvis har samma egenskaper som mätare av typ 5 med en cirka +1% förskjutning beroende på kalibreringskurvans egenskaper. Även här blir debiteringsfelet oförändrat eller börjar t o m sjunka något vid överdimensionering av mätaren.

Mätare av typ 3 och 4 visar sjunkande debiteringsfel vid överdimensionering av mätaren. Detta beror på att om de mest frekventa flödesförbrukningarna fördelar sig kring kalibreringskurvans skärningspunkt med abskissan (mätfel = 0) så inträffar inom ett begränsat område en utjämningseffekt mellan inverkan av positiva och negativa fel, p s s som beskrivits ovan. En sådan mätare skulle dock vara mindre pålitlig vid en avläsningsintervall kortare än ett år. I synnerhet skulle en avläsning gjord under vintersäsongen genomförd t ex i syfte att beräkna medelavkylning av fjärrvärmevatten, leda till markant positivt (mätartyp 3) eller negativt (mätartyp 4) fel.

Inom vissa svenska energiverk lär det finnas en praxis att vid kalibrering justera mindre mätare så att kalibreringskurvan till övervägande del skall uppvisa svagt negativt fel. Detta i syfte att öka säkerheten mot överdebitering. I föreliggande undersökning skulle detta motsvara mätare av typ 1 eller 4.

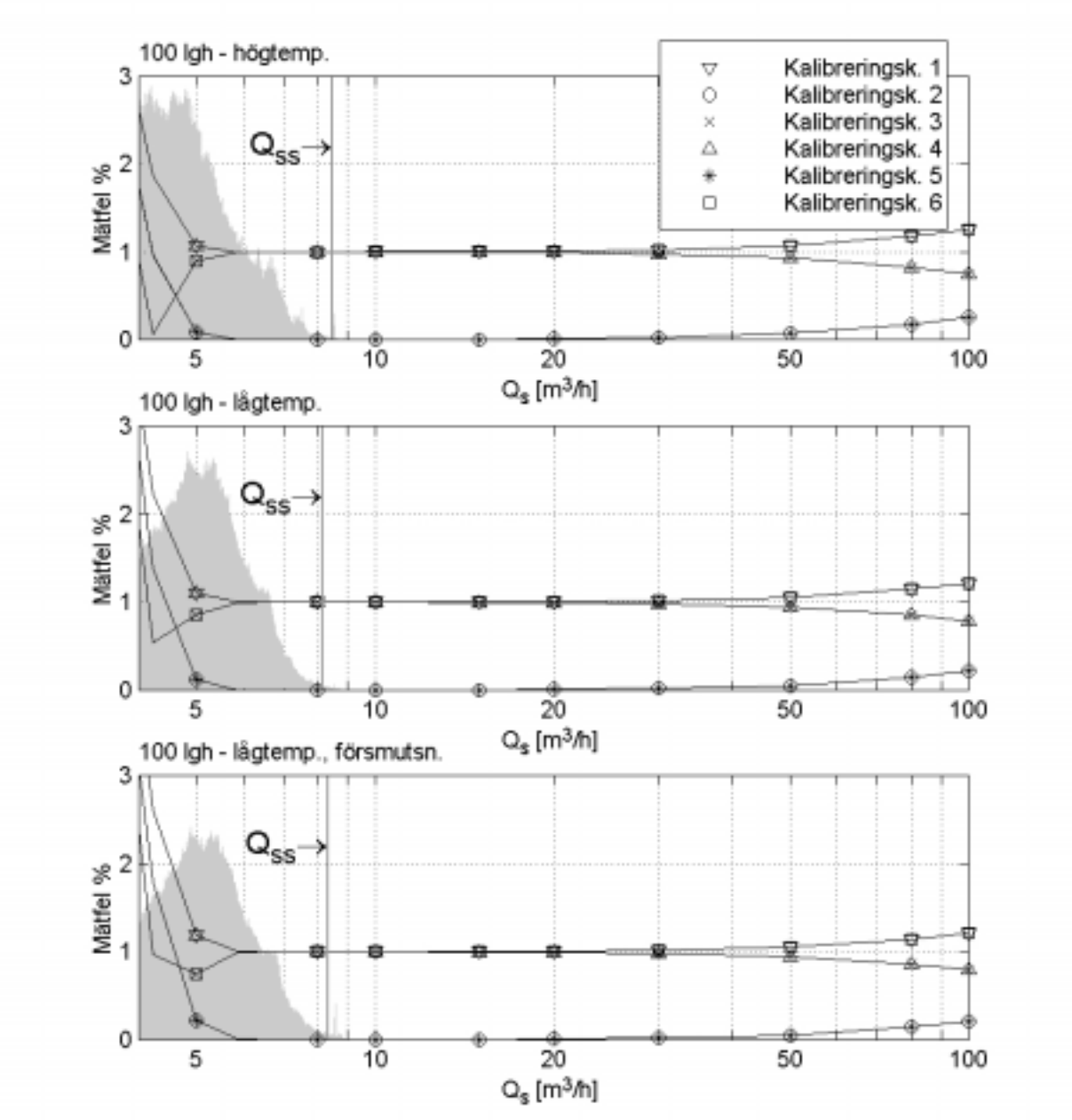
Sammantaget kan konstateras att flödesmätaren i en energimätare för villa måste väljas med omsorg vad gäller storleken om man inte har tillgång till en pålitlig mätare med kalibreringskurva typ 5 som tål rejäl överdimensionering. I en typisk mätare med arbetsområde Q_i/Q_s=1:200 är noggrannheten inom flödesintervallet $0.05Q_s – Q_s$ av primärt intresse för den slutliga noggrannheten.



Figur 15 Fel i värmedebitering för ett års förbrukning i ett bostadshus om 20 lägenheter (absolutvärde) som funktion av mätarstorlek. Fall med hög- och lågtemperatursystem visas.

En annan viktig slutsats är att det beräknade största primärflödet som kan förekomma under året i en fjärrvärmecentral som dimensionerats enligt FJV:s aktuellt gällande rekommendationer, är ett bra utgångsvärde för val av flödesmätarens storlek. I en fjärrvärmecentral med korrekt valda värmeväxlare påverkas inte valet av flödesmätare nämnvärt av rimlig försmutsning.

Figur 15 och 16 visar motsvarande resultat för bostadshus om 20 respektive 100 lägenheter. Resultaten är snarlika och kan diskuteras samtidigt. Simuleringsresultaten för bostadshus skiljer något från de som erhållits för en villa. Trenden mot att det lägsta debiteringsfelet motsvarar flödesmätarens noggrannhet inom området $0.05Q_s – Q_s$ är mycket klar här och felkurvornas minimiplatå har betydligt bredare omfång, 2–10 m^3/h för huset med 20 lägenheter och 6 – 60 m^3/h för huset med 100 lägenheter.



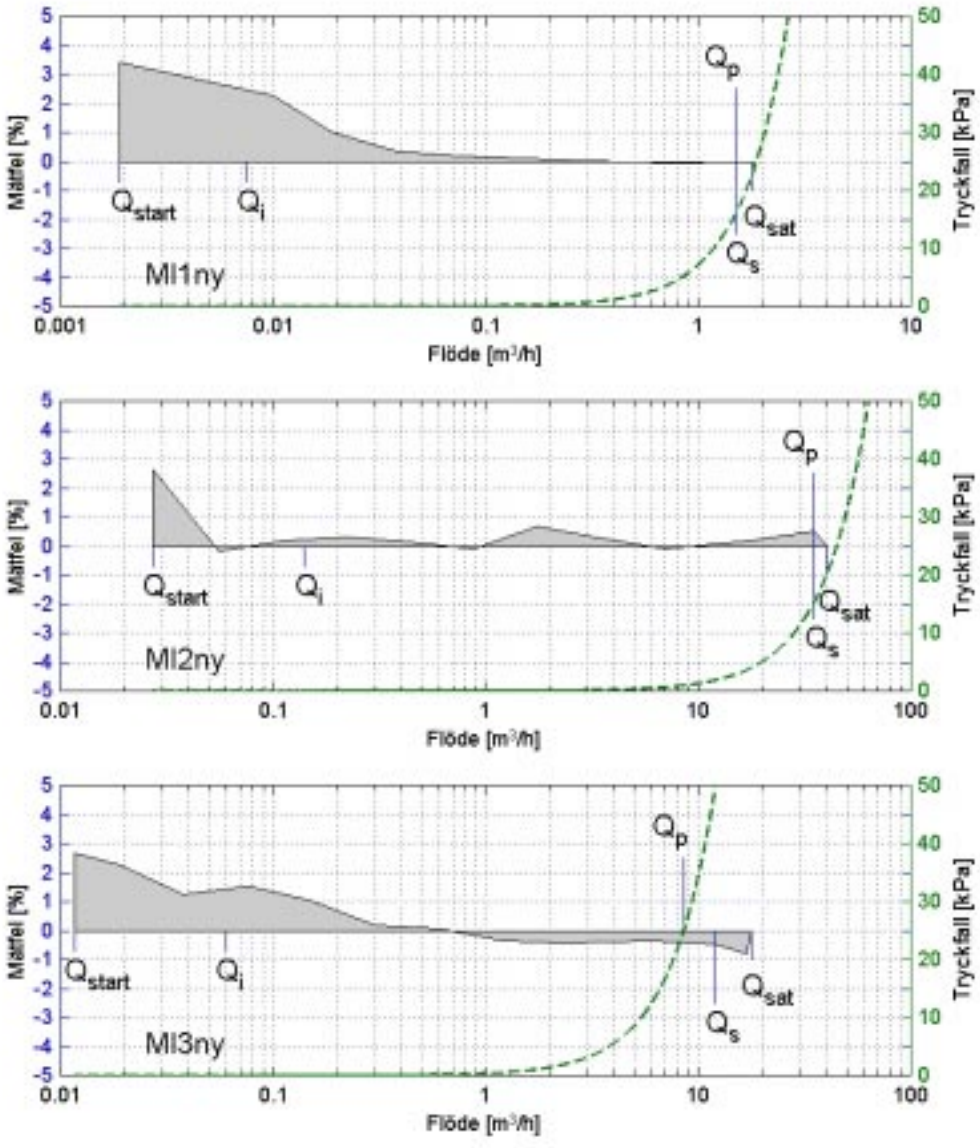
Figur 16 Fel i värmedebitering för ett års förbrukning i ett bostadshus om 100 lägenheter (absolutvärde) som funktion av mätarstorlek. Fall med hög- och lågtemperatursystem samt med ett lågtemperatursystem med försmutsade värmeväxlare visas.

5.2 Kalibreringskurvor hos nya flödesmätare

Analysen i föregående avsnitt omfattade idealiserade flödesmätare med definierat flödesområde som enda begränsning. I en verklig mätare uppstår mätfel vars storlek beror på hur stort det mätta flödet är i förhållande till mätområdet. Mätaren orsakar även tryckfall i fjärrvärmeledningen. I detta avsnitt kommer analysen att upprepas med hänsyn tagen till alla de ovannämnda faktorerna.

För att kunna jämföra de verkliga mätarnas kalibreringskurvor med de syntetiska kurvorna testades sex fabriksnya födesmätare i provrigg på Sydkraft Mätteknik AB. Provprogrammet var utformat enligt vad som anges i tabell 6 (placerad i slutet av detta avsnitt). Värdena i de gråskuggade fälten i tabellen låg under riggens mätområde, försök gjordes dock för att åtminstone uppskatta varje mätarens startflöde. Mätarna, som specifieras i tabell 5, utlånades från Göteborg Energi AB.

Figur 17 och 18 presenterar resultat av kalibreringen. Det gråskuggade fältet visar mätarens mätfel vid olika flöden och den streckade kurvan visar mätarens tryckfallskurva. Det framgår att om tryckfallet vid ett flöde motsvarande Q_s är högre än 25 kPa då blir Q_p mindre än Q_s. Beteckningen Q_{sat} (Q-saturation) innebär övre gräns för mätarens faktiska arbetsområde. Man



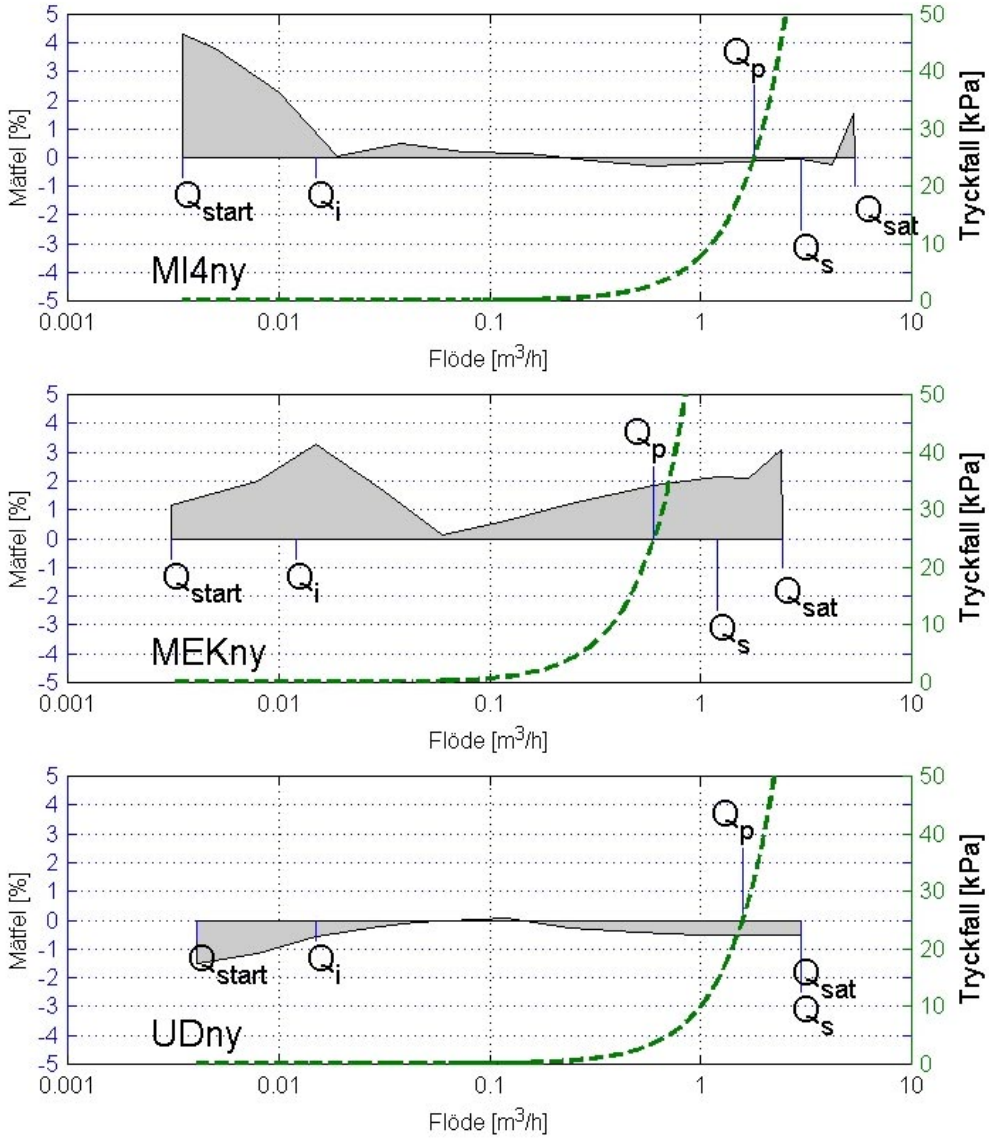
Figur 17 Uppmätta kalibreringskurvor samt tryckfallskurvor för flödesmätare *MI1ny*, *MI2ny* och *MI3ny*.

kan även se att alla undersökta mätare börjar registrera flöde väsentligt under det specifierade värde Q_{min} och med god noggranhet. Förhållandet mellan värdena Q_p, Q_s och Q_{sat} är väldigt olika beroende på mätartyp och kan inte generaliseras.

Fabrikat/typ	Q_i [m^3/h]	Q_p [m^3/h]	Q_s [m^3/h]	Mätprincip
MI1ny	0.0075	1.5 (1.87)	1.5	MI
MI2ny	0.14	35.0 (44.7)	35.0	MI
MI3ny	0.06	8.5 (8.5)	12.0	MI
MI4ny	0.015	1.79 (1.79)	3.0	MI
Udny	0.015	1.58 (1.58)	3.0	Ultraljud
MEKny	0.012	0.60 (0.60)	1.2	Mekanisk

Tabell 5 Fabriksnya flödesmätare testade för att fastställa deras kalibreringskurvor. Värdena inom parentestecken anger flöde då tryckfall över mätaren är 25 kPa.

Genom att utnyttja resultat från föregående avsnittet kan man försöka på förhand bedöma vilken av de testade mätarna som borde fungera bäst vid värmemätning. Jämförelse mellan de

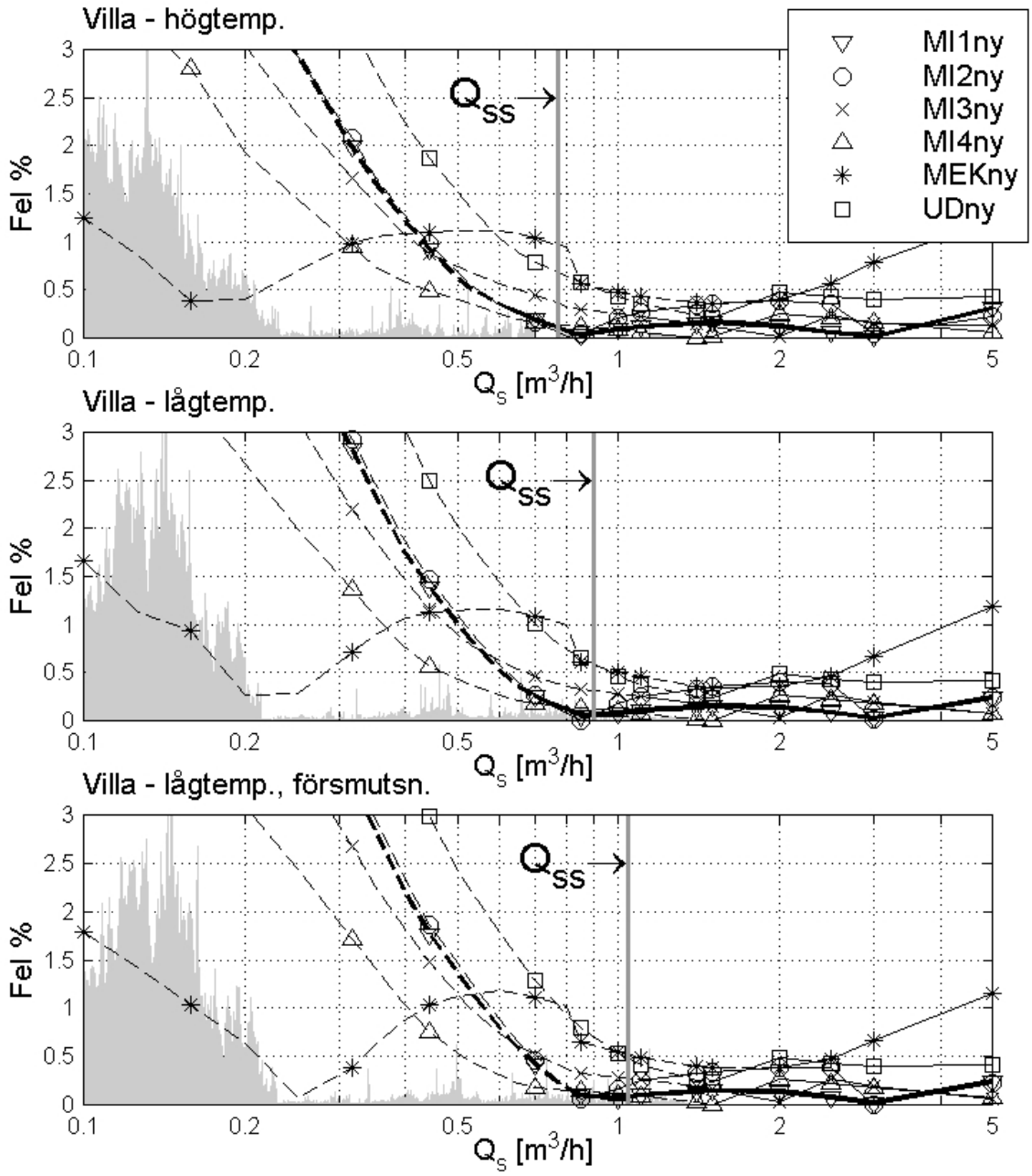


Figur 18 Uppmätta kalibreringskurvor samt tryckfallskurvor för flödesmätare *MI4ny*, *MEKny* och *UDny*.

syntetiska och de uppmätta kalibreringskurvorna ger vid handen att kalibreringskurva 5, som resulterade i minsta debiteringsfelet, efterliknas mest av kalibreringskurvan hos mätaren *MI1ny* som kommer att markeras med en något tjockare linje i diagrammen nedan.

Figur 19 visar beräknat absolutvärde av debiteringsfel som uppstår i en villa då man använder de verkliga flödesmätarna. Vid jämförelse med figur 14 ser man en hel del likheter även om det förekommer individuella variationer bland mätare. Exempelvis visar mätaren *UDny*'s kurva ett beteende motsvarande en mätare med kalibreringskurva 1 eller 2. Mätaren *MI1ny* presterar som förväntat bra inom ett brett arbetsområde även om skillnaden inte är stor jämfört med de övriga mätarna.

En ny parameter som inte fanns med vid bedömning av mätare med de syntetiska kalibreringskurvorna är här tryckfallet. Förutom att mätaren ger god noggrannhet måste den vara

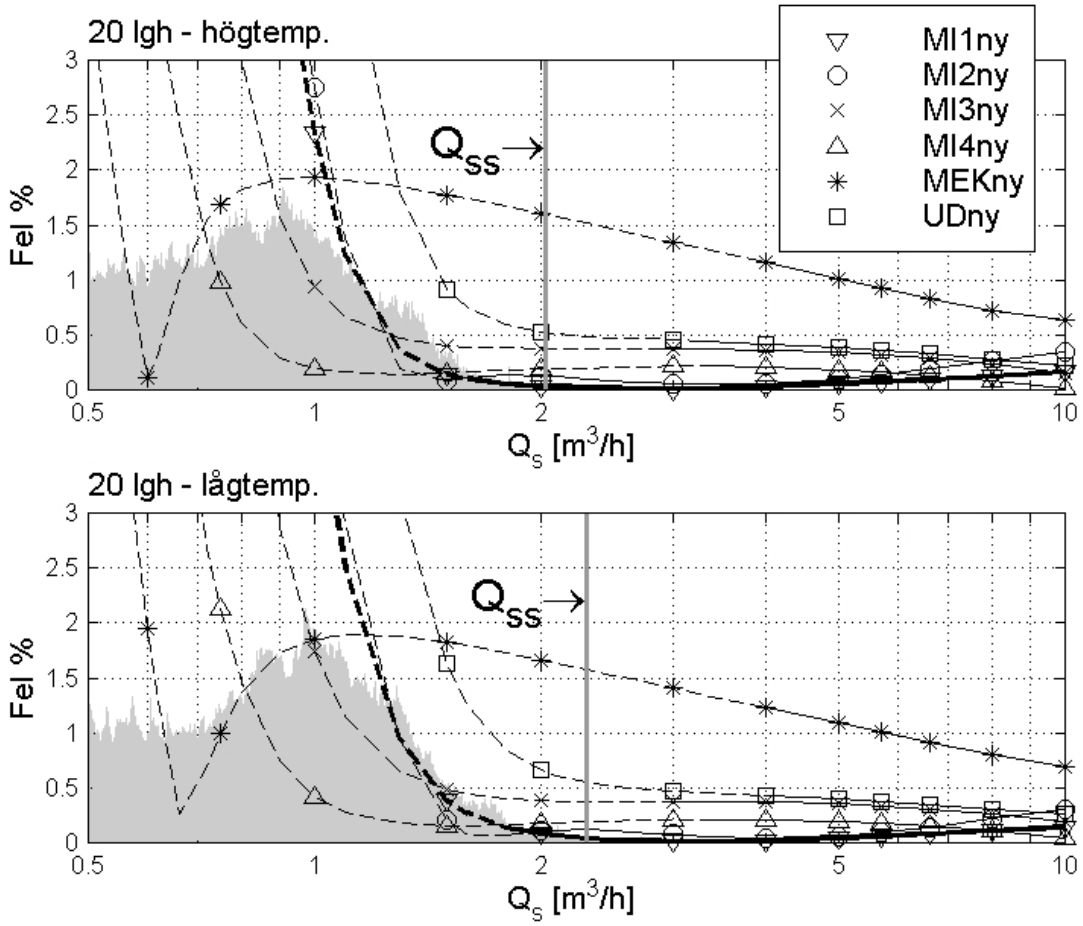


Figur 19 Fel i värmedebitering för ett års förbrukning i en villa (absolutvärden) som funktion av mätarstorlek Q_s för fabriksnya mätare. Fall med hög- och lågtemperatursystem samt med ett lågtemperatursystem med försmutsade värmeväxlare visas. Jämför med figur 14.

hydrauliskt anpassad till fjärrvärmecentralens övriga komponenter. För att sätta en gräns för hur länge mätaren är användbar ur hydraulisk synpunkt antas här att tryckfallet vid det tidigare diskuterade dimensionerande flödet Q_{ss} inte skall överstiga 25 kPa. Ett sådant villkor säkerställer om att vid eventuell belastning upp till 1.41 Q_{ss} blir tryckfallet högst 50 kPa. I diagram i figur 19-21 markeras detta genom att felkurvorna är heldragna så länge mätarstorleken är sådan att tryckfallen vid flöden lägre än Q_{ss} inte överskrider 25 kPa, och streckade annars. I praktiken innebär detta att mätarstorlekarna inom område där respektive mätarens felkurva är streckad anses vara hydrauliskt för små för de största förekommande flödena. Observera dock att andra gränsvärden, beroende på det tillgängliga differenstrycket över fjärrvärmecentralen, kunde väljas.

Om man analyserar diagrammen i figur 19 kommer man till slutsatsen att en mätare av storleken Q_s = 0.9–2.0 m^3/h är ett korrekt val. En mindre storlek kan väljas vid kalibreringskurva av typ *MI1ny* eller *MI4ny* medan kalibreringskurva av typ *MI2ny* eller *MI3ny* ger minsta debiteringsfel vid något större mätarstorlek.

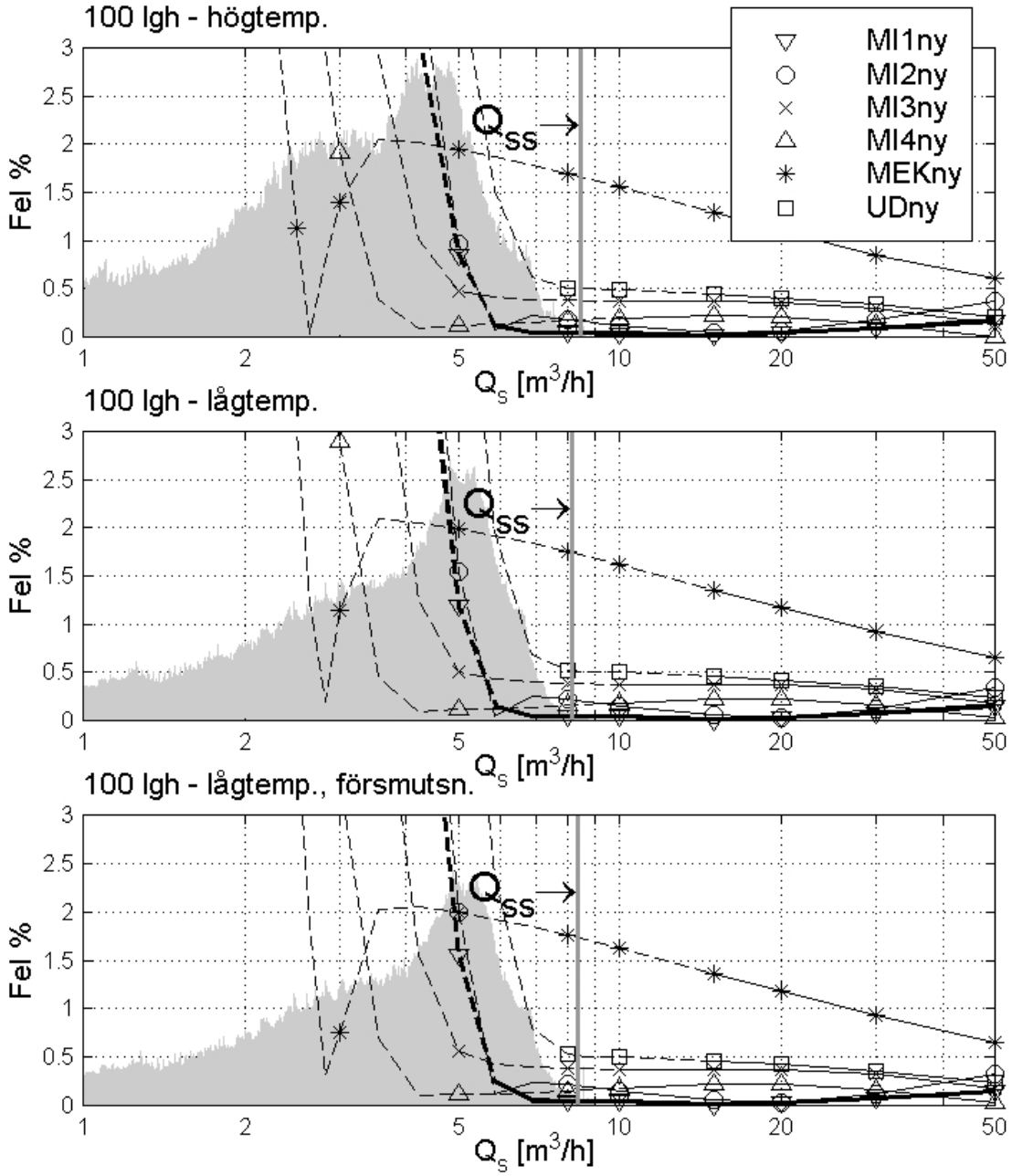
Figur 20 och 21 kan jämföras med figurerna 15 och 16. Även här minskar betydelsen av mätarens noggrannhet vid små flöden medan noggrannheten vid medelstora och stora flöden blir av avgörande betydelse. Tryckfallsgränsen blir här av mindre vikt då mätaren utan svårighet kan väljas något överdimensionerad utan att debiteringsnoggrannheten påverkas negativt. Den optimala mätarstorleken blir Q_p = 2–5 m^3/h för huset om 20 lägenheter och c:a Q_p = 8–30 m^3/h för huset om 100 lägenheter.



Figur 20 Fel i värmedebitering för ett års förbrukning i ett bostadshus om 20 lägenheter (absolutvärde) som funktion av mätarstorlek Q_s för fabriksnya mätare. Fall med hög- och lågtemperatursystem visas. Jämför med figur 15.

Testflöde	Q_{start}					Q_i		Q_t			$0.5Q_s$	Q_s	$1.4Q_s$	$2Q_s$
% av Q_s →	0,04	0,08	0,15	0,3	0,6	1	2	5	10	20	50	100	141	200
↓ $Q_n=0.5Q_s$	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*	*l/h*
0.6 m³/h	0,48	0,96	1,8	3,6	7,2	12	24	60	120	240	600	1200	1692	2400
0,75 m³/h	0,6	1,2	2,25	4,5	9	15	30	75	150	300	750	1500	2115	3000
1,5 m³/h	1,2	2,4	4,5	9	18	30	60	150	300	600	1500	3000	4230	6000
5 m³/h	4,8	9,6	18	36	72	120	240	600	1200	2400	6000	12000	16920	24000
15 m³/h	14	28	52,5	105	210	350	700	1750	3500	7000	17500	35000	49350	70000

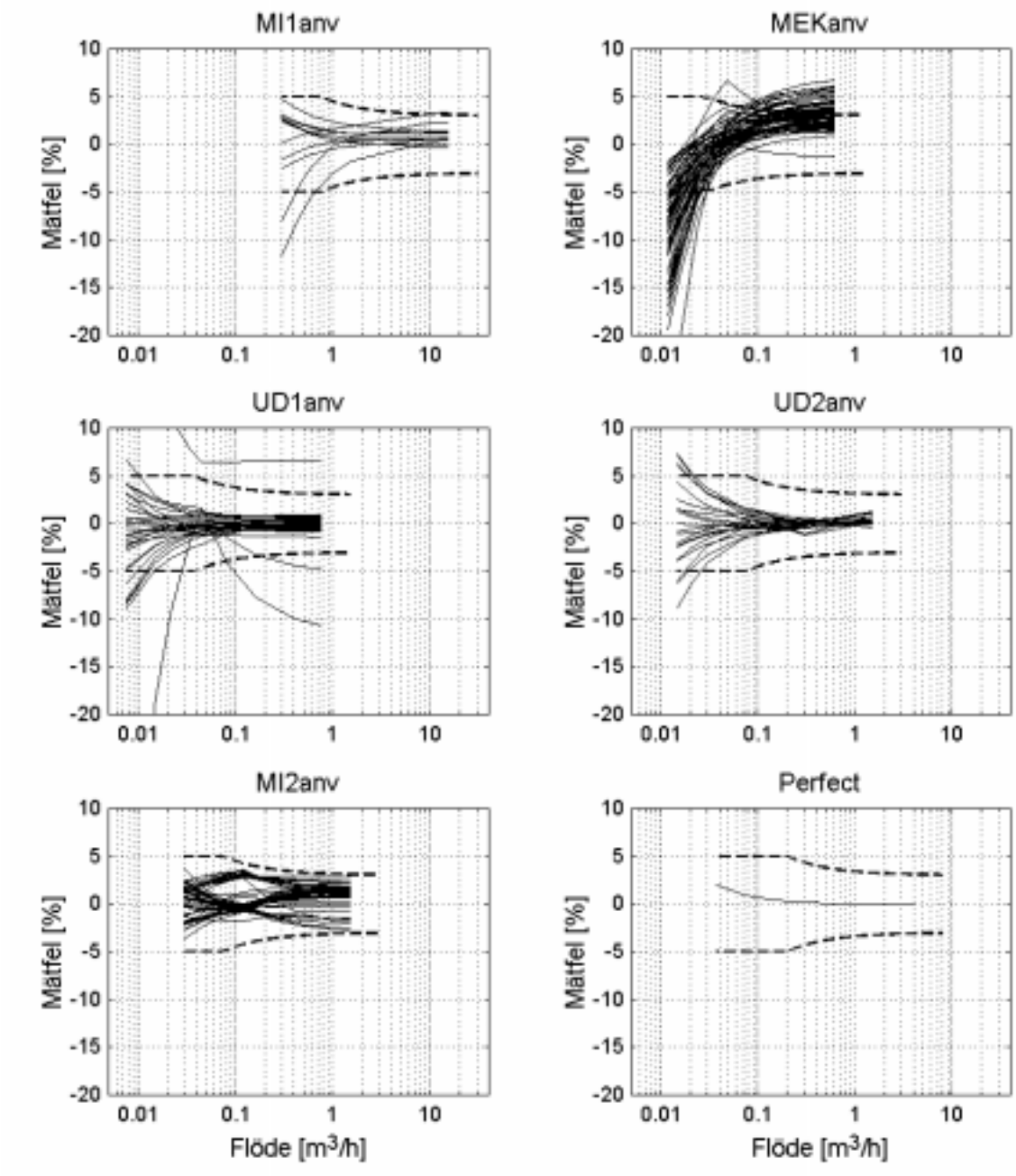
Tabell 6 Provprogram för olika flödesmätarstorlekar ($Q_n=0.5Q_s$) för att fastställa deras kalibreringskurvor.



Figur 21 Fel i värmedebitering för ett års förbrukning i ett bostadshus om 100 lägenheter (absolutvärde) som funktion av mätarstorlek Q_s för fabriksnya mätare. Fall med hög- och lågtemperatursystem samt med ett lågtemperatursystem med försmutsade värmeväxlare visas. Jämför med figur 16.

5.3 Kalibreringskurvor hos använda flödesmätare

En analys av inverkan av kalibreringskurvor hos verkliga flödesmätare på debiteringsnoggrannheten skulle inte vara fullständig om man inte försökte klargöra hurdan långtidsstabiliteten hos sådana kurvor är. För att klargöra detta upprepas analysförfarandet från föregående avsnitt här med kalibreringskurvor erhållna genom provning av mätare som varit i drift under lång tid (2 år för de mekaniska mätarna och 5 år för de statiska). Kalibreringsdata omfattar resultat av provning utförd av företaget Kamstrup A/S (en mätartyp) och av Göteborg Energi AB (fyra typer av mätare). Mellan c:a 10 och 200 exemplar av respektive mätartyp testades. Figur 22 nedan visar diagram som sammanställer alla provningsresultat. Diagrammet med beteckning ”Perfect” visar en syntetisk kurva av typ 5 (se avsnitt 5.1) som tagits med i ett jämförande syfte. Mätarna var testade vid ackrediterad mätarverkstad enligt



Figur 22 Kalibreringskurvor hos flödesmätare som testats efter 2-5 års användning i fjärrvärmenät. Felgränskurvor plottade inom flödesområdet Q_i – Q_s.

standard kalibreringsprocedur vilket innebär kontroll av mätfel vid flöden motsvarande Q_{min}, Q_t och Q_n =0.5Q_{max} (enligt de gamla beteckningarna). Mätfelsgränserna inom intervallet Q_{min}–Q_{max} finns också angivna. Observera att kurvanpassning är utförd i diagrammen enligt metod använd av företaget Kamstrup (Brummer 1998). Förteckning över de testade flödesmätarna visas i tabell 7.

Fabrikat/typ	Q_i (Q_{min}) [m^3/h]	Q_t [m^3/h]	0.5Q_s (Q_n) [m^3/h]	Mätprincip
MI1anv	0.30	1.5	15	MI
MEKanv	0.012	0.048	0.6	Mekanisk
UD1anv	0.0075	0.045	0.75	Ultraljud
UD2anv	0.015	0.15	1.5	Ultraljud
MI2anv	0.03	0.12	1.5	MI

Tabell 7 Sammanställning av flödesmätare som testats efter 2-5 års användning i fjärrvärmenät

Kalibreringskurvorna i figur 22 visar att det kan bli en stor spridning mellan mätfel hos olika exemplar av samma typ av mätare. En generell trend är att skillnaden oftast är störst när det gäller mätfelet vid de låga flödena. Att både negativa och positiva fel förekommer tyder på att mätare kan degradera på olika sätt. En principiell skillnad finns mellan de statiska mätarna och den mekaniska mätaren *MEKanv* som testats, nämligen att hos den mekaniska mätaren blir mätfelet vid små flöden alltid negativt medan det överlag blir positivt vid höga flöden.

Innan undersökning av kurvornas inflytande på debiteringsfelet påbörjades, sorterades alla kurvor som på ett kraftigt sätt avvek från genomsnittet, t ex de för mätare som stannar helt vid låga flöden, bort.

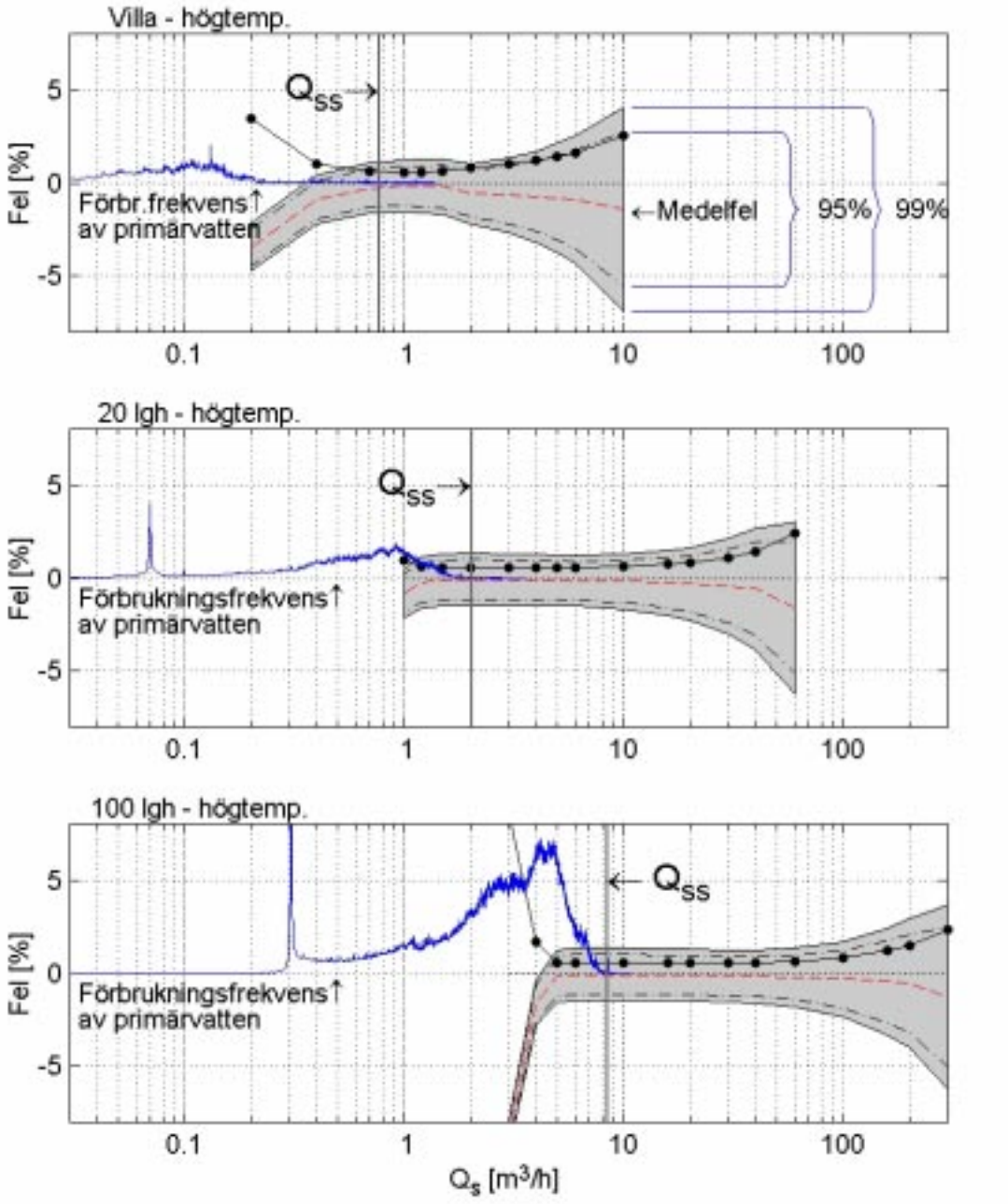
En viktig skillnad, jämfört med utvärderingarna genomförda i tidigare avsnitt av detta kapitel, är att man disponerar många kalibreringskurvor för en och samma typ av mätare. Följaktligen beräknas debiteringsfelet för en viss typ (och storlek) av flödesmätare som ett medelvärde av fel beräknade för alla exemplar av mätartypen. Även standardavvikelse beräknas vilket gör det möjligt att bedöma hur stor är sannolikheten att felet avviker från sitt medelvärde med ett visst belopp. Eftersom skillnaden mellan hötemperatur- och lågtemperaturfallet har visat sig vara liten tidigare, genomförs här enbart beräkningar för högtemperaturfallet.

I figur 23 visas resultat av analys av debiteringsfelet genomförd för olika storlekar av mätaren *UD1anv*. Belastningar som gäller för tre olika husstorlekar behandlas p s s som tidigare. Till vänster i diagrammen visas, såsom i tidigare visade diagram, primärvattenförbrukningsmönstret under ett kalenderår, medan det skuggade fältet täcker med 99% sannolikhet alla möjliga utfall av debiteringsfelet som funktion av mätarstorlek (Q_s). En streckad linje i mitten visar medelfelet, medan de två punkt-strecklinjerna visar hur stort det skuggade fältet skulle vara om bara 95% av alla utfall beaktades. Man kan säga att i och med att man tar hänsyn till ett flertal exemplar av mätare på samma gång, tillkommer en dimension vid utvärdering av debiteringsfelet. Det framgår att medelfelet blir ökande negativt vid både högra och vänstra kanten av felfältet. På samma sätt som tidigare innebär detta att mätaren har blivit så pass mycket för stor respektive för liten att en betydande del av förekommande flöden har hamnat under respektive över mätarens arbetsområde.

Vid val av optimal mätarstorlek i samband med den här analysen, kan man konstatera att ur rent ekonomisk synvinkel borde man välja den storlek som medför det minsta medelfelet. Detta skulle på ett adekvat sätt täcka värmeproducentens rörliga kostnader. Ur kundernas synvinkel är det dock antagligen minst lika viktigt att alla betalar i proportion till sin förbrukning,

så att t ex en villakund som sparar värme kan vara säker på att betala mindre än grannen som inte är lika sparsam. En uppsättning av mätare som tillsammans registrerar rätt medelvärde på den levererade värmemängden men som har mycket varierande mätnoggrannhet skulle således varken främja energisparandet eller ge nöjda kunder. Den enstaka mätarens noggranhet är också av stor betydelse när värmeleverantörens taxa innehåller flödesberoende komponenter eller vid konditionsövervakning av fjärrvärmecentralen mm.

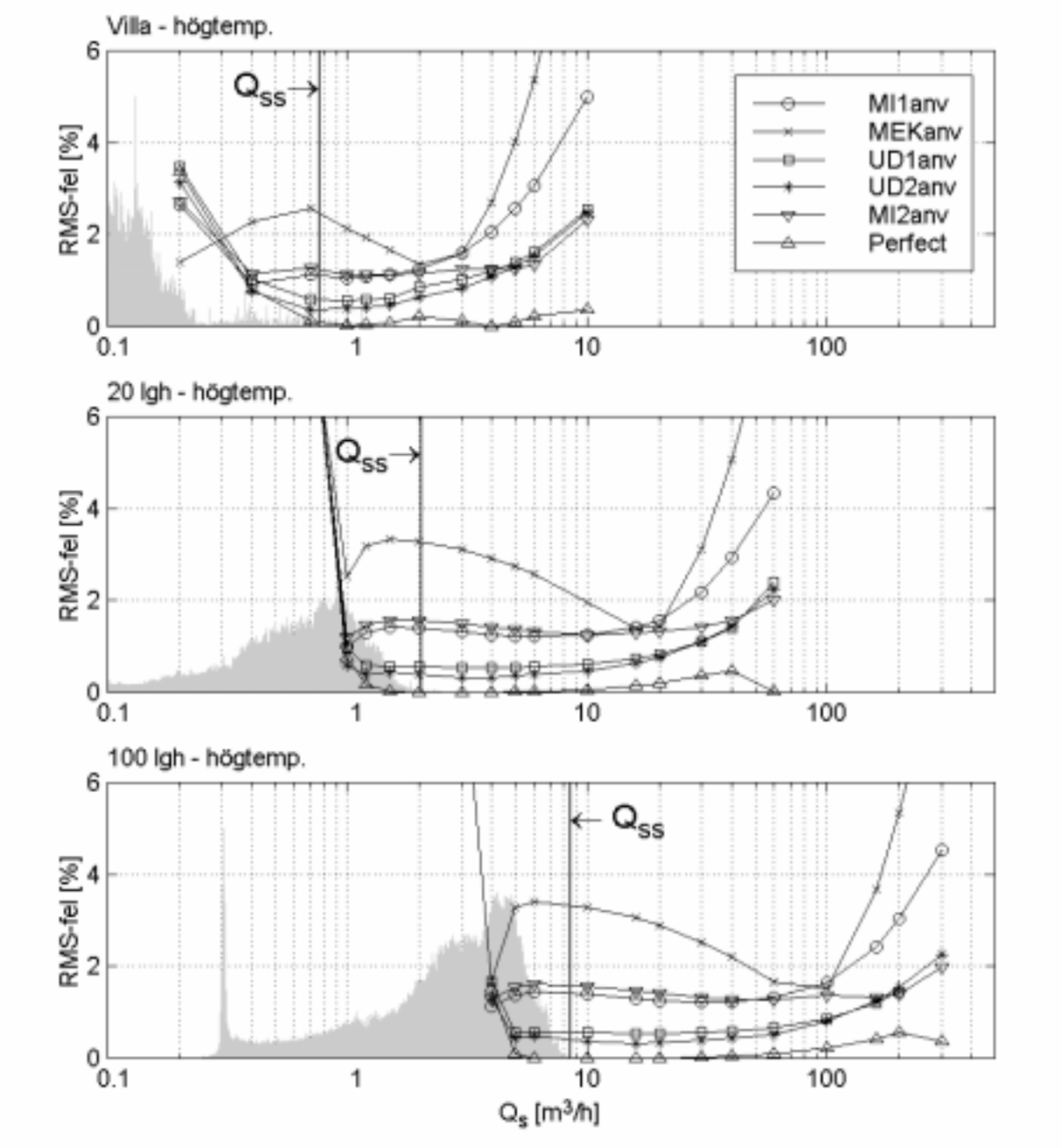
För att i möjligaste mån tillgodose de ovannämnda kraven, används här värde av kvadratroten ur kvadratsumman av medelfelet och standardavvikelsen, vidare kallat RMS-fel, som ytterligare ett kriterium vid valet av mätarstorleken. RMS-felet är alltid positivt och visas i diagrammen som en rad svarta punkter sammanbundna med en kontinuerlig linje. Här innebär det en sammanvägning av medelfelet och sannolikheten att det aktuella felet avviker från det.



Figur 23 Medelfelet och dess spridning samt RMS-felet som funktion av mätarstorlek Q_s baserat på kalibreringskurvor för mätare *UD1anv*.

I den här undersökningen sammanföll RMS-felminima väl med medelfelets minima för alla de undersökta flödesmätarna. Respektive RMS-felkurvor visas i figur 24.

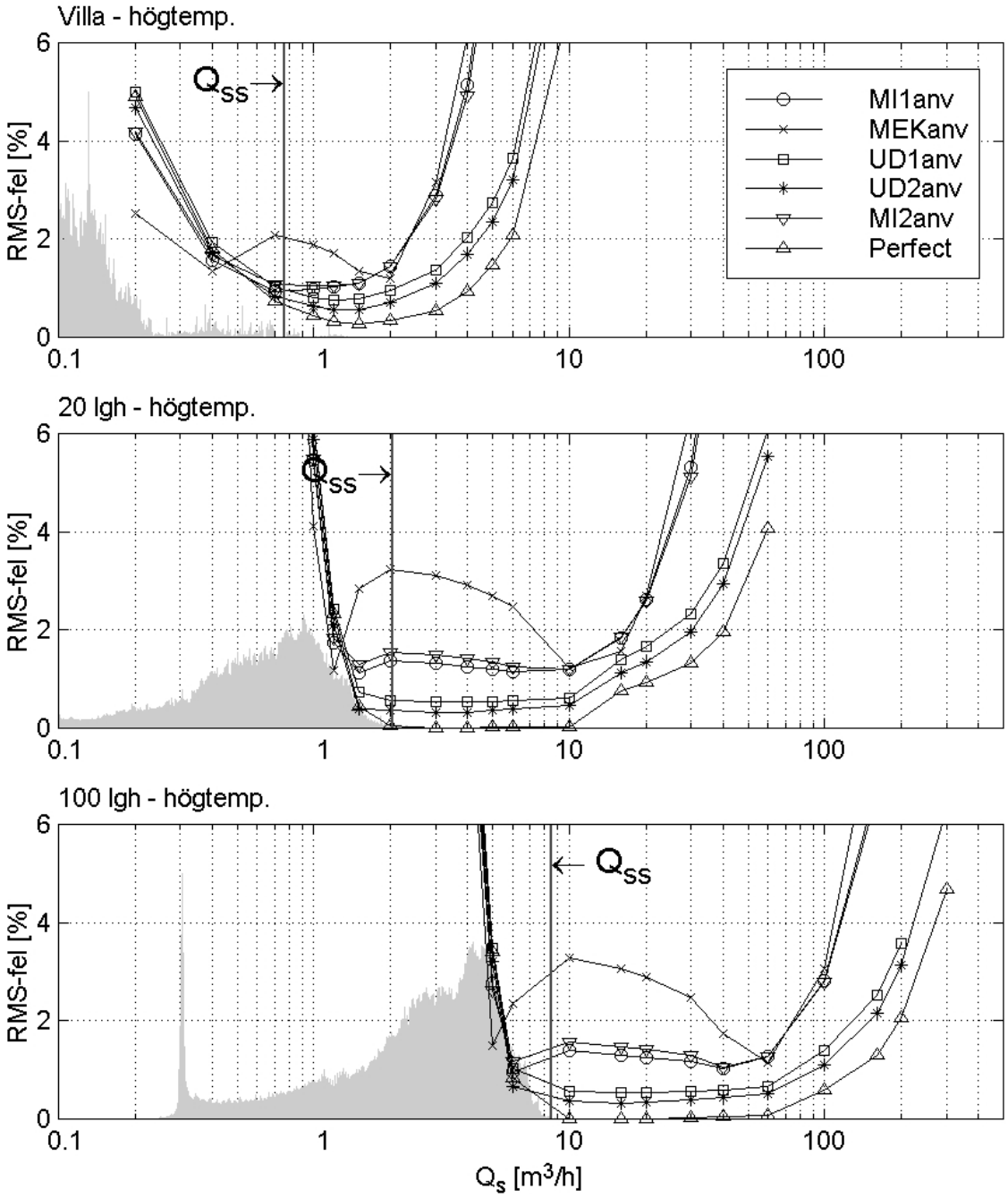
Felkurvorna i figurens diagram har samma karaktär som kurvorna i figur 14-16 samt 19-21. Det finns dock två principiella skillnader här. För det första är RMS-felet något större än det felet som visats i de ovannämnda figurerna eftersom, som redan sagt, RMS-felet innefattar även osäkerheten i individuell debitering, i form av standardavvikelse. För det andra visas i figur 24 ett mycket bredare flödesområde, 0.1–500 m^3/h. Detta medför att den övre gränsen för det optimala mätarstorleksintervallet kan fastställas med större säkerhet. I praktiken spelar dock den övre gränsen mindre roll eftersom man normalt strävar efter en rimligt liten, och därmed billig, mätare. Möjligen kan den övre gränsen vara intressant i ett fall med en villa



Figur 24 Medelfelet och dess spridning samt RMS-felet som funktion av mätarstorlek Q_s baserad på kalibreringskurvor erhållna från Kamstrup A/S och Göteborg Energi AB.

men även där är fler mätarstorlekar möjliga att välja.

Man kan konstatera att det även här är möjligt att bedöma vilken mätare som kommer att ge bättre resultat jämfört med en annan, utifrån analys av de bådas kalibreringskurvor. Om man studerar kurvorna i figur 22 då väljer man *Perfect* samt *UD1anv* och *UD2anv* framför de övriga mätarna vilket är befogat om man jämför med de kurvor som ger lägsta RMS-fel i figur 24. Det framgår även att *MEKanv* är det mest osäkra valet. Den optimala mätarstorleken kan uppskattas till Q_p = 0.7–3.0 m^3/h för en villa, Q_p = 1.5–15 m^3/h för huset om 20 lägenheter och Q_p = 6–60 m^3/h för huset om 100 lägenheter.



Figur 25 Medelfelet och dess spridning samt RMS-felet som funktion av mätarstorlek Q_s såsom i figur 24, men med flödesmätarens mätintervall begränsat till Q_i – Q_s .

Man kan fråga sig här hur det kan vara möjligt att mätarstorleken kan varieras inom storleksintervall 1:10 i flerbostadshusfallet. Man får då komma ihåg att en flödesmätares mätintervall i praktiken är betydligt större än Q_i/Q_s som är typiskt 1:100 (för större mätare). Tar man hänsyn till ett möjligt $Q_{start}=0.25Q_i$ och ett möjligt $Q_{sat}=1.4$ då utökas mätintervallet till c:a 1:500 vilket skall jämföras med det mätta flödets variationsvidd mellan c:a 1:60 och 1:30 för 20 lägenhets- respektive 100 lägenhetsfallet. En viss felutjämning, som beror på mätarens felkurva, tillkommer. Således är de erhållna resultaten inte alls orimliga. Självfallet skall man dock behålla en viss säkerhetsmarginal vid valet av mätarstorleken då de angivna gränserna motsvarar genomsnittlig fjärrvärmevattenförbrukning som kan ju variera i individuella fall.

Ett sätt att bestämma snävare gränser för valet av mätarstorleken är att minska vidden hos det i föregående stycket diskuterade mätintervallet hos flödesmätaren. En lämplig begränsning av mätintervallet kan vara $Q_i - Q_s$ istället för $Q_{start} - Q_{sat}$. Figur 25 visar resultat av beräkning av RMS-felet utförd under förutsättning att inga flöden lägre än Q_i registreras och att flöden större än Q_s registreras som Q_s . En klar likhet med resultat visade i figur 24 kan iakttas men minimum-platåerna är nu betydligt snävare. Detta gäller i synnerhet villafallet där inte ens den idealiserade mätarens RMS-fel får värdet noll för någon mätarstorlek. Fortfarande är dock Q_{ss}-värdet ett bra riktvärde för den minsta godtagbara storleken på en flödesmätare för värmemätning. Acceptabla mätarstorleksintervall avlästa i figurerna 19-21 samt i figur 24 och 25 sammanställs i tabell 8.

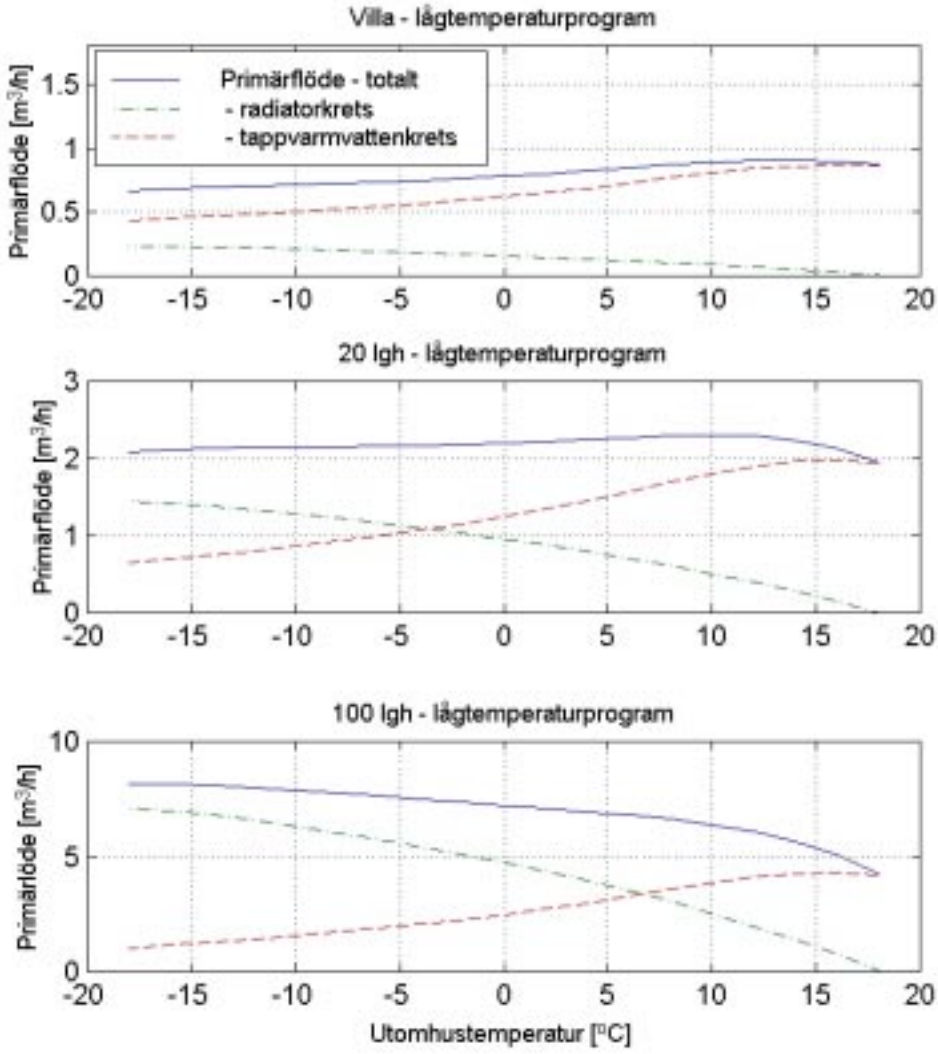
Möjliga mätarstorlekar Q_s [m³/h] ↘	**Ny mätare** $Q_{start} - Q_{sat}$	**Begagnad mätare** $Q_{start} - Q_{sat}$	**Begagnad mätare** $Q_i - Q_s$
Villa	0.9 – 2.0	0.7 – 1.5 (3.0)	1 – 2
Flerbostadshus, 20 lgh	2 – 5	1.5 – 15	2 – 10
Flerbostadshus, 100 lgh	8 – 30	6 – 100	10 – 60

Tabell 8 Sammanställning av möjliga val av mätarstorlek uttryckt i Q_s enligt avsnitt 5.2 och 5.3. Resultat i den sista kolumnen gäller vid snävare mätintervall hos flödesmätaren.

6 Slutsatser och rekommendationer

Ur innehållet i kapitel 4 och 5 framgår ett antal kriterier för bestämning av flödesmätarstorleken för energidebitering i en fjärrvärmecentral. Dessa kriterier kommer att sammanställas och diskuteras nedan.

Ett möjligt tillvägagångssätt vid val av mätarstorlek är att anpassa mätaren till dimensionering av fjärrvärmecentralen. I figurer 7 och 8 visades redan primärvattenflödena som simulerades fram respektive beräknades som dimensionerande vid modellering av respektive central. I figur 26 visas hur primärflödena i respektive central fördelas mellan radiator- och tappvattenkrets. Man ser tydligt att regler för bestämning av det ur dimensioneringssynvinkel störst möjliga flödet i en fjärrvärmecentral inte kan betraktas som självklara. Både storlek, kopplingstyp och aktuella temperaturprogram måste beaktas. I det presenterade fallet förväntas flödet kunna bli störst på sommaren i en (parallellkopplad) villacentral, vid temperaturprogrammets brytpunkt för 2-stegskopplad central i bostadshuset om 20 lägenheter och vid den dimensionerande utomhustemperaturen för motsvarande central i ett hus med 100 lägenheter. Övergången från att primärflödet kan bli störst på sommaren i en villacentral, mot störst flöde på hösten/våren eller vintern i större flerbostadshus beror helt och hållet på det ändrade storleksförhållandet mellan tappvatten- och radiatorkretsen vilket kan ses i figurens diagram. I

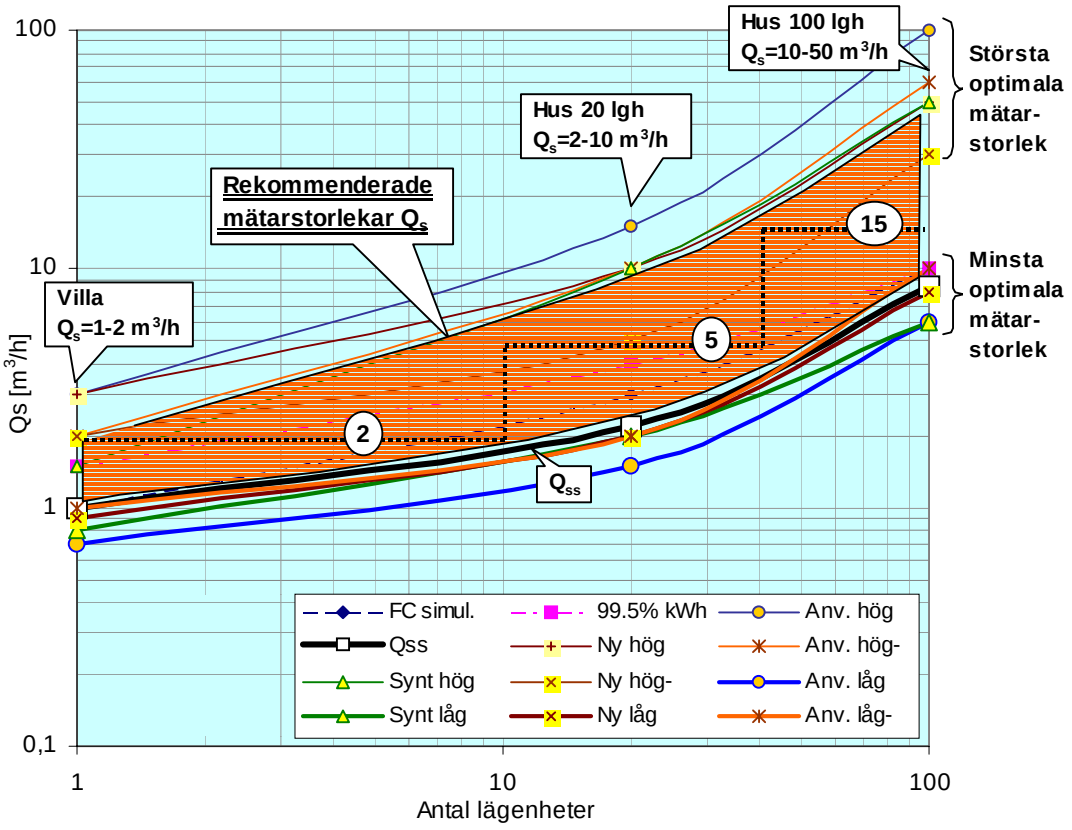


Figur 26 Dimensionerande flöden i olika stora fjärrvärmecentraler med uppdelning mellan radiator- och tappvarmvattenkretsen. Lågtemperaturprogramfallet.

grova drag kan således konstateras att man borde dimensionera flödesmätare för den dimensionerande tappvattenlasten i villor och i hus upptill 20 lägenheter medan i hus över 100 lägenheter borde man dimensionera för den högsta radiatorlasten. Fjärrvärmeföreningens råd och anvisningar (1996) skall följas. Figur 27 sammanställer alla mätardimensioneringskriterier som diskuterats i detta arbete. Kurvornas innebörd förklaras nedan.

De streckade linjerna betecknade "FC simul." och "99.5% kWh" motsvarar lämpliga flödesmätarstorlekar avlästa i figur 9 och figur 12 (kapitel 4). Dessa värden borde betraktas som rimliga rekommendationer med reservationen att man därmed inte har tagit någon hänsyn till flödesmätarens egenskaper. Övriga kurvor i diagrammet är heldragna och är uppdelade i två grupper, där de tjocka kurvorna innebär den minsta tillåtna mätarstorleken enligt ett visst kriterium medan de tunna kurvorna innebär den största tillåtna mätarstorleken. Kurvan med beteckning "Qss" motsvarar värden som återfinns i diagram i kapitel 5 medan beteckningarna "Synt", "Ny" samt "Anv" motsvarar resultat erhållna i kapitel 5.1, 5.2 och 5.3 respektive. Det gråskuggade fältet i mitten markerar området som täcker mätarstorlekar som rekommenderas för så litet debiteringsfel som möjligt oberoende av mätartyp. Observera begränsad valmöjlighet för en villa och betydande valfrihet för flerbostadshus.

En slutsats som kan dras från figuren sammanfattas av en tjock, trappstegsformad linje inuti det gråskuggade fältet. Linjen visar att flödesmätning för värmedebitering i hus av olika storlekar, från en villa upp till ett bostadshus om 100 lägenheter, kan hanteras med bara tre mätarstorlekar: Q_s = 2, 5 och 15 m^3/h. Beroende på valda säkerhetsmarginaler kan fler mätarstorlekar väljas. Diagrammet är konstruerat så att ingen hänsyn behöver tas till tryckfall i flödesmätaren så länge $Q_p = Q_s$, eftersom de valbara mätarstorlekarna förutsätter $Q_p > Q_{ss}$. Detta innebär att mätaren kan under alla omständigheterna överbelastas upp till 40% över Q_{ss} utan



Figur 27 Sammanställning av de alla diskuterade kriterierna för val av lämplig flödesmätarstorlek beroende på fjärrvärmecentral/husstorlek.

att tryckfallet överstiger 50 kPa.

Vid val av säkerhetsmarginalerna får man ta hänsyn till vilket arbetsområde och mätnoggrannhet den verkliga flödesmätaren som man överväger att använda har. Allmänt kan bara sägas att en kalibreringskurva av typ 5 (se avsnitt 5.2) är att föredra och att mätarens förhållande mellan Q_{min} och Q_s borde vara högst 1/200 för en villa medan det räcker med förhållandet 1/100 för flerbostadshus. Lägre Q_{min}/Q_s innebär dock större arbetsområde och att mätaren kan täcka fler hus av olika storlekar.

Sist men inte minst borde man fråga sig hur pass generella resultaten i figur 27 är. För detta måste man rekapitulera vilka antaganden som har gjorts:

Fjärrvärmevattnets framledningstemperaturprogram gäller för Malmös nät

> Malmönätets temperaturprogram är anpassat till at ge hög och jämn avkylning av primärvattnet genom att dess temperaturbrytpunkt är vid c:a 10 °C utomhus. Ett program med brytpunkt vid lägre temperatur kunde leda till mer uttalat maximum för primärvattenförbrukning än vad man kan se främst för bostadshus om 20 lägenheter i figurer 8 och 25. Generell sänkning av primärvattnets temperaturprogram behöver inte påverka det dimensionerande flödet i radiatorsystemet men påverkar alltid dimensionering av tappvarmvattenberedaren om sommartemperaturen sänks.

Radiatorsystemet är dimensionerat enligt 80/60- eller 60/45-regeln

> Detta följer FVF:s rekommendationer. För annan dimensionering måste de rekommenderade gränserna i figur 27 justeras proportionellt mot ändrad Q_{ss}. Såsom redan nämnts under föregående punkt kan utformning av framledningstemperaturprogrammet på både primär- och sekundärsida av radiatorvärmeväxlaren leda till höga primärflöden nära brytpunktstemperaturen vilket måste beaktas då Q_{ss} bestäms (jmf FJV-handboken [ref]).

Tappvarmvattenberedaren i fjärrvärmecentralen är av genomströmningstyp

> Detta är mycket viktigt i mindre hus där tappvarmvattenlasten dominerar dimensionering. Dimensionering enlig FVF:s rekommendationer har följts här och för annan dimensionering måste de rekommenderade gränserna i figur 27 justeras proportionellt mot ändring av Qss. Lägre sommartemperatur på primärsidan ger högre dimensionerande flöde. En förrådsberedare i en villa borde ge betydligt lägre dimensionerande flöde men, beroende på beredarens utförande, sämre primärvattenavkylning (i synnerhet i slutfasen av förrådsbehållarens laddning) som kan leda till tidvis höga primärflöden.

Fjärrvärmecentralen är parallellkopplad i en villa och 2-stegskopplad i ett flerbostadshus

> En 2-stegskopplad fjärrvärmecentral är varken tekniskt eller ekonomiskt motiverad i en villa. Vid en parallellkopplad central som betjänar ett flerbostadshus måste man räkna med större Q_{ss} jämfört med en 2-stegskopplad central. I synnerhet lastfall vid utomhustemperaturer nära brytpunktstemperaturen måste kontrolleras. Den understa gränsen av dimensioneringsarean i figur 27 måste höjas proportionellt mot ökning av Q_{ss} medan den översta gränsen ej justeras.

Flödesmätarens faktiska mätområde är $0.25Q_{min} – 1.4Q_s$ samt $Q_p = Q_s$

> Ovan angivna gränser för mätområdet kan variera. Mätare med både större och mindre faktiska mätområden förekommer. Det är speciellt viktigt att betrakta en mätare med egenskapen $Q_{sat} < 1.4Q_s$ som om den faktiskt var av storleken $Q_s = Q_{sat}/1.4$ om rekommendationerna i fig 27 skall gälla. Om Q_p är betydligt mindre än Q_s då måste hänsyn tas till att mätarens faktiska arbetsområde minskar till $Q_{start} – 1.4Q_p$.

Dimensioneringsanalys som ger underlag för de ovan beskrivna justeringarna genomförs redan rutinmässigt hos en del värmeproducenter vid val av flödesmätarstorlek. Rapportens resultat bör äga en generell giltighet även om smärre justeringar kan behövas i fall då inte alla ovannämnda förutsättningar är uppfyllda.

7 Referenser

AGFW International Symposium, 8-10 December 1997, (1997), *Working Experiences on the Durability and Service Life of Heat Meters.*, Hamburg, Tyskland.

Aronsson, S., (1996), *Fjärrvärmekunders värme- och effektbehov. Analys baserad på mätresultat från femtio byggnader.*, Doktorsavhandling, Inst. för installationsteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Arvastson, L., Wollerstrand, J., (1997), *On Sizing of Domestic Hot Water Heaters of Instantaneous Type.*, 6th International Symposium on Automation of District Heating Systems, Reykyavik, Iceland.

Brümmer, H., Kamstrup A/S, (1997), *Personlig kommunikation.*

Fjärrvärmecentralen, Råd och anvisningar för anslutning till fjärrvärmesystem. (1996), Svenska Fjärrvärmeföreningen, Stockholm.

Frederiksen, S., Werner S., (1993), *Fjärrvärme. Teori, teknik och funktion.*, Studentlitteratur, Lund.

Gummérus, P., (1989), *Analys av konventionella abonnentcentraler i fjärrvärmesystem.*, Inst. för energiteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Holmberg, S., (1987), *Tekniska meddelanden 316.*, Doktorsavhandling, Inst. för uppvärmnings- och ventilationsteknik, Kungliga Tekniska Högskola, 1987:2 (vol. 18), Stockholm.

Ingimundarson A., (1997), *Measurement Errors and Dimensioning of Flow Meters in District Heating Systems.*, Stipendiatrapportering, Inst. för värme- och kraftteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

Ingimundarson A., (1998), *Dimensioning of Flow Meters in District Heating Systems.*, Stipendiatrapportering, Inst. för värme- och kraftteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

Ingimundarson A., Wollerstrand J., Arvastson L., (1998), *On Sizing of Flow Meters used in Customer Accounting Devices in District Heating Systems.*, FLOMEKO'98, 9th International Conference on Flow Measurement, Lund.

Näslund, M., (1997), *On the Design of Residential Condensing Boilers.*, Doktorsavhandling, ISRN LUTMDN/TMVK-1011-SE, Inst. för värme- och kraftteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

Svensson, B., (1996), *In-Situ Test Methods in District Heating Systems.*, Licentiatavhandling, Tekniska Högskolan i Luleå, 1996:46 L.

Winberg, J., (1992), *On hot water storage in district heating subscriber stations. System measurements.*, Rapport LUTMDN/(TMVK_7009)/1-76/(1992), Inst. för värme- och kraftteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

Svensk Standard/Europastandard SS-EN 1434, (1997), *Värmemätare*, SIS.

List of figures

Figure 1 Flow chart describing the problem solving procedure used to investigate the influence of the choice of the flow meter on heat metering accuracy.

Figure 2 Calibration curve for an average flow meter of the static type. Nomenclature:

Q_{start} – the lowest flow rate which can be measured (accuracy unspecified)
Q_i – the lowest flow rate measured at specified accuracy (former Q_{min})
Q_p – the largest continuous flow rate which can be measured at pressure drop less/equal 25 kPa
Q_s – the largest flow rate measured at specified accuracy (former Q_{max})
Q_{sat} – the largest flow rate which can be measured (accuracy unspecified)
Q_n – $0{,}5Q_{max}$ (obsolete)

Figure 3 The district heating company temperature scheme for primary water and space heating water supply.

Figure 4 Schematic diagram of the building model.

Figure 5 Connecting scheme of 2-stage type district heating substation.

Figure 6 Simulated daily domestic hot water consumption pattern for a single family house and for residential buildings, 20 and 100 flats large, as well as the outdoor air temperature measured in Malmö, Sweden during the period April 1996 – March 1997.

Figure 7 Calculated maximum primary water flow at the sizing load for all the cases simulated.

Figure 8 Calculated maximum primary water flow as a function of the outdoor temperature for all the cases simulated.

Figure 9 District heating water flow rate distribution in residential buildings during one year. The high temperature case.

Figure 10 Cumulative district heating water usage in residential buildings during one year. The high temperature case.

Figure 11 The distribution functions of district heating water flow rates caused by space heating in residential buildings during one year. The high temperature case.

Figure 12 Cumulative district heating water usage in residential buildings during one year as a function of accumulated heat usage. The high temperature case.

Figure 13 Some possible calibration curves for a flow meter.

Figure 14 Yearly heat accounting error (absolute value) as a function of flow meter size used in single family house. Three cases are presented: high temperature system, low temperature system and the low temperature system when heat exchangers are fouled.

Figure 15 Yearly heat accounting error (absolute value) as a function of flow meter size used in residential building with 20 flats. Two cases are presented: high temperature system and low temperature system.

Figure 16 Yearly heat accounting error (absolute value) as a function of flow meter size used in residential building with 100 flats. Three cases are presented: high temperature system, low temperature system and the low temperature system when heat exchangers are fouled.

Figure 17 Measured calibration curves and pressure drops for flow meters *MI1ny*, *MI2ny* and *MI3ny*.

Figure 18 Measured calibration curves and pressure drops for flow meters *MI4ny*, *MEKny* and *UDny*.

Figure 19 Yearly heat accounting error (absolute value) as a function of flow meter size used in single family house. The flow meters are new. Three cases are presented: high temperature system, low temperature system and the low temperature system when heat exchangers are fouled. See also figure 14.

Figure 20 Yearly heat accounting error (absolute value) as a function of flow meter size used in residential building with 20 flats. The flow meters are new. Two cases are presented: high temperature system and low temperature system. See also figure 15.

Figure 21 Yearly heat accounting error (absolute value) as a function of flow meter size used in residential building with 100 flats. The flow meters are new. Three cases are presented: high temperature system, low temperature system and the low temperature system when heat exchangers are fouled. See also figure 16.

Figure 22 Measured calibration curves for flow meters which has been in operation for 2–5 years in district heating systems. Error limit curves plotted within $Q_i - Q_s$.

Figure 23 Mean flow measurement error and error deviation, as well as RMS-error as a function of flow meter size, Q_s. Calculations based on calibration curves of flow meter *UD1anv*.

Figure 24 Mean flow measurement error and error deviation, as well as RMS-error as a function of flow meter size, Q_s. Calculations based on calibration curves delivered by the companies Kamstrup A/S and Göteborg Energi AB.

Figure 25 Mean flow measurement error and error deviation, as well as RMS-error as a function of flow meter size, Q_s. The curves are analogous to those shown in figure 24 but the operating range of the flow meter is limited to $Q_i - Q_s$ only.

Figure 26 Calculated maximum primary water flow as a function of the outdoor temperature in three different sizes of district heating substations. The participation of space heating circuit and domestic hot water circuit in the total flow rate is also shown. Low temperature case.

Figure 27 Summary of all the criteria for optimum flow meter size choice, depending on the size of the district heating substation and of the building.

List of tables

Table 1 Dimensioning temperature data for simulation model.

Table 2 Dimensioning data for space heating and domestic hot water consumption.

Table 3 Sample of flow meters with different sizes and working ranges.

Table 4 Comparison between operating range of flow meters according to table 3 an the corresponding load variation according to figure 12.

Table 5 Results of calibration of new manufactured flow meters in test rig. The values within parentheses are corresponding to the flow rate at pressure drop 25 kPa across the meter.

Table 6 Sample flow rate values for calibration of a range of sizes (Q_n=0.5Q_s) of flow meters.

Table 7 Compilation of test results of flow meters which has been in operation for 2–5 years in district heating systems.

Table 8 Compilation of possible flow meter size (Q_s) choices according to section 5.2 and 5.3. Results in the last column of the table are calculated under assumption that the operating ranges of the flow meters considered are reduced.