

**FJÄRRAVLÄSNING
MED SIGNALER GENOM RÖRNÄT -
- FÖRSTUDIE**

Lars Ljung
Allgon Inovation AB

Rolf Sjöblom
ÅF-Energikonsult AB

mars 2002

SAMMANFATTNING

Svenska Fjärrvärmeföreningen (FVF) har i sitt forskningsprogramarbete identifierat fjärravläsning av fjärrvärmemätare som ett särskilt angeläget område. Det är en väsentlig fördel om sådan fjärravläsning kan göras oberoende av sådana system som kunden eller andra förfogar över. En underlättande omständighet i sammanhanget är att behovet av överföringshastighet är låg, vilket innebär att även låga frekvenser kan komma i fråga i princip.

Syftet med det aktuella uppdraget är att få fram underlag för bedömning av om överföring av växelström genom fjärrvärmerören skulle kunna erbjuda ett tillämpbart alternativ. Vissa överväganden har även gjorts beträffande en angränsande teknik som innebär en magnetisering av rören.

Genomgång av befintliga systemtyper för signalöverföring genom elnät och telenät samt trådlös överföring indikerar att man ofta får anpassa systemen med avseende på frekvensband, överföringshastighet, signalstyrka samt användande av redundans/paritetskontroll. Utvecklingen går snabbt och mot mycket breda tillämpningar (d v s stora produktionsvolymerna och stort utrymme för utvecklingskostnader) och exempelvis uppskattas priset per enhet för trådlös överföring över korta avstånd till under 200 SEK.

Markens dielektriska egenskaper visade sig vara av mindre betydelse för dämpningen av signalen. En kontroll gjordes emellertid av att de antaganden som gjorts för beräkningarna var konservativa.

Överslagsberäkningar indikerade att eventuellt möjliga tillämpningar bör sökas inom storleksordningarna 10 kHz - 10 MHz. Ytterligare beräkningar pekade på att den undre gränsen kan sättas till 1 MHz eftersom kortslutningen till jord annars blir alltför effektiv.

En transmissionsbudget upprättades utgående från uppskattningar avseende olika förluster: vid ändpunkterna, vid förgreningspunkter, sträckdämpning, termiskt brus med flera. Resultatet indikerade att en signal kanske skulle kunna överföras.

Försök utfördes därför på fjärrvärmenätet hos Mälarenergi AB i Västerås och signalöverföring kunde konstateras vid 7 - 12 MHz över ett avstånd av ca 600 meter.

För alternativet med magnetisering av fjärrvärmerören utfördes endast vissa kvalitativa överväganden. Sannolikt läcker det magnetiska fältet till omgivningen såvida inte avståndet mellan sändare och mottagare är kort. Dessutom krävs sannolikt att frekvensen är låg.

I ingetdera fallet kunde någon enskild diskriminerande omständighet identifieras.

Däremot kunde i båda fallet ett flertal gravt försvårande omständigheter identifieras, framförallt följande:

- Liten marginal (om någon) för att få fram signalen, och dessutom starkt varierande förutsättningar. Små eller inga möjligheter till förstärkning av signalen på vägen.
- Svårbemästrad miljö med avseende på fukt och temperatur samt viss svårighet med elförsörjning.
- Speciell tillämpning. Svårigheter att hantera utvecklingskostnaderna p g a begränsad volym tillämpning.

För växelströmsalternativet tillkommer dessutom att bakgrundsnivån befunnits vara hög och kan antas variera.

Mot denna bakgrund gjordes bedömningen att ingen rekommendation kan göras till fortsatta insatser.

SUMMARY

In its R&D programme work, the Swedish District Heating Association has identified remote reading of meters for heat transfer as an area of high priority. It is considered that a significant advantage is obtained if such remote reading can be made entirely independently of any other systems which the customer or anyone else is in charge of. A simplifying condition in this context is the fact that the requirements on rate of information transfer is very low which means that also low frequencies may be considered.

The purpose of the presently reported work is provide a basis for assessment of whether or not transmission of alternating electric current through district heating pipes might offer a realistic alternative. Some considerations have also been made on a related technique based on magnetisation of the pipes.

A compilation of existing types of systems for signal transfer through electric distribution lines, telephone lines and wireless transmission indicate that the systems will have to be accommodated with regard to frequency band, rate of transmission, signal strength, and redundancy / parity control. The development in this area is very rapid and is also heading in the direction of very broad applications (i e large production volumes and the associated acceptability of high development costs). For instance, the cost per unit for wireless transmission over short distances is being estimated to below about USD 20.

It appeared during the course of the work that the dielectric properties of the surrounding soil was of minor importance for the attenuation of the signal. A control was made, however, of the assumptions made, and they were found to be conservative as intended.

“Back of an envelope” calculations indicated that conceivably possible applications should be sought in the frequency range 10 kHz - 10 MHz. Further calculations indicated that 1 MHz might be an appropriate lower limit since the connection to earth would be too efficient otherwise.

A transmission budget was established based on estimates on losses at the end points, losses at at branchings of the pipe system, attenuation in the straight pipe, thermal noise, e t c. The result indicated that it might be possible to transfer a signal.

Tests were carried out on the district heating system at Mälarenergi AB in Västerås and signal transmission was confirmed at 7 - 12 MHz over a distance of about 600 meters.

Only certain qualitative considerations were made in the case of transfer of information by means of magnetisation. It was assessed that the leakage of magnetic field away from the pipe is probably excessive unless the distance between the transmitter and receiver is short. In addition, the frequency to be used must probably be low.

No single discrimination factor could be identified for either of the cases.

However, number of factors could be identified which can be expected to make realisation very difficult, in particular the following:

- There is only a small margin – if any – for receiving the signal. In addition, the conditions vary over time. There are no or small possibilities to amplify the signal inbetween the transmitter and the receiver.
- The environment has a high temperature and may be very humid. Some difficulty may also be encountered with respect to electric power supply.
- A realisation may be peculiar to the present application. Difficulties may therefore be foreseen on handling the development costs for a limited volume of application.

In addition – for the alternative with alternating current – the background level was found to be high and also to vary considerably over time.

In view of these difficulties, the assessment is made that no recommendation can be given on continued efforts in this area.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	SAMMANFATTNING.....	ii
	SUMMARY.....	iv
1	INLEDNING, SYFTE OCH ANSATS.....	1
	1.1 Inledning.....	2
	1.2 Syfte.....	2
	1.3 Ansats.....	2
2	DATAÖVERFÖRING.....	4
	2.1 Befintliga systemtyper.....	4
	2.2 Bredband via elnätet.....	5
3	MARKENS DIELEKTRISKA EGENSKAPER.....	7
4	TEORETISKA FÖRUTSÄTTNINGAR.....	8
	4.1 Frekvensområden.....	8
	4.2 Datahastighet och bandbredd.....	8
	4.3 Transmissionsbudget.....	9
	4.4 Sändareffekt.....	9
	4.5 Störnivå vid mottagare.....	9
	4.6 Dämpning av signal via rörnät.....	9
	4.7 Rör i halvledande jord.....	10
	4.8 Förluster vid anslutningar.....	13
	4.9 Förluster vid förgreningspunkter och ventilbrunnar.....	14
	4.10 Övriga förluster.....	15
	4.11 Uppskattad transmissionsbudget.....	15
5	MÄTNINGAR I FJÄRRVÄRMENÄT.....	17
	5.1 Utförande.....	17
	5.2 Resultat.....	17
	5.3 Slutsatser från mätningarna.....	19
6	ALTERNATIV METOD MED MAGNETISERING.....	20
7	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	21
	7.1 Växelström.....	21
	7.2 Magnetisering.....	21
8	REFERENSER.....	23

1 INLEDNING, SYFTE OCH ANSATS

1.1 Inledning

Svenska Fjärrvärmeföreningen (FVF) driver ett program för forskning och utveckling inom fjärrvärmeområdet. Inriktningen av detta program styrs av de behov som identifierats och de övergripande mål som ställts upp. Ett område som konstaterats vara särskilt angeläget är fjärravläsning av energimätare.

FVF räknar med att en stor del av den energi som levereras i dag inte kan debiteras. Det finns flera skäl för detta. Ett viktigt skäl är begränsningen i den mätnoggrannhet som själva mätarna ger. Här har FVF sedan flera år finansierat utvecklingsinsatser och det har nu kommit ut bättre komponenter på marknaden som mäter med god precision med hjälp av ultraljudspulser.

För ett effektivt system som helhet för debitering krävs emellertid också att mätarna kan fungera utan störningar och att mätdata kan föras över från kunden till leverantören med hög tillförlitlighet. För detta är det av stort värde om försörjning och överföring kan göras oberoende av sådana system som kunden eller andra förfogar över.

En komponent i "störningsfriheten" utgörs av tillförlitlig matning av ström till mätarna. Här har tidigare utförts en förstudie som visat att sådan försörjning kan åstadkommas utan extern strömförsörjning utan enbart med utnyttjande av den värme som finns i systemet[1].

Avläsning av mätare sker i dag i stor utsträckning manuellt. Detta innebär i sig en kostnad som skulle kunna rationaliseras bort genom någon form av fjärravläsning. Om ett system för fjärravläsning införs skulle ett sådant emellertid sannolikt ha ett mervärde i förhållande till manuell avläsning. Genom ett mera frekvent avläsande kunde anomalier i uppmätt värmeförbrukning kunna fångas upp och felaktiga mätare identifieras. Fjärravläsning öppnar också upp för utnyttjande av felindikering från mätarna till fjärrvärmeleverantören. Dessutom medger fjärravläsning differentierade taxor med hänsyn till tid på året och tid på dygnet.

När det gäller fjärravläsning ligger det kanske nära till hands att i första hand tänka på modern informationsteknologi med överföring av signaler via mobilt telefonnät, ordinarie telefonnät, elnätet eller internet i någon form. En relativt uttömmande genomgång av sådana möjligheter har tidigare genomförts av FVF.[2]

Sådana system innebär fördelar genom att de finns samt kan förväntas byggas ut inom de närmaste åren.

De innebär emellertid också vissa nackdelar. De ägs inte av fjärrvärmeleverantören och kan därför lättare manipuleras av kund eller annan. Vidare krävs uppkoppling från fjärrvärmecentralen hos kunden till

den anslutning som denne har, vilket kräver ledningsdragning eller installation av elektronikkomponenter för trådlös överföring, med därmed sammanhängande sårbarhet.

Den datahastighet som erfordras för kommunikation med fjärrvärmemätare är relativt liten. Detta innebär att ”IT-lösningar” i sig inte är påkallade.

Om man i stället skulle söka identifiera vilka typer av system som är lämpliga med hänsyn till de aktuella funktionskraven, dvs oberoende och så lite installationer som möjligt så förefaller det intressant att - om möjligt - söka utnyttja de fjärrvärmerör som redan finns installerade för att överföra data från värmemätarna. Detta skulle kunna ske genom att mätdata moduleras till en radiofrekvent växelström som överförs i marken med fjärrvärmerören fungerande ungefär som mittledaren i en koaxialkabel.

Teoretiskt bör en fjärrvärmeledning fungera som en relativt god ledare av lågfrekventa radiosignaler. Detta bör gälla så länge den termiska isoleringen fungerar som elektrisk isolering och den omgivande marken som återledare eller dielektrikum.

I praktiken finns det dock ett antal problem som behöver studeras och värderas.

1.2 Syfte

Syftet med det uppdrag som redovisas i denna rapport är att få fram underlag för bedömning av om den tilltänkta tekniken över huvud taget kan bedömas vara tillämplig för det aktuella behovet. För detta eftersträvas identifiering av eventuella diskriminerande faktorer.

1.3 Ansats

Följande frågor bedömdes initialt vara av betydelse:

- risken för ”kortslutning” till omgivande mark vid förgreningar, inspektionsbrunnar och så vidare
- dämpning på grund av att radiovågen strålar ut från rörledningen
- störsignaler från till exempel elledningar och järnvägar
- variationer i markens dielektriska egenskaper
- graden av komplexitet i den utrustning som erfordras

Som underlag för bedömningar av frågor kring nätverksuppbyggnad och komplexitet redovisas kortfattat befintlig teknik för informationsöverföring exemplifierat med bredbandsöverföring över elnätet, se avsnitt 2.

Initialt bedömdes markens dielektriska egenskaper kunna ha betydelse för framkomligheten för signalen. Analysen i avsnitt 4 visar att så knappast är fallet. En sammanfattning av resultat och slutsatser ges ändå i avsnitt 3.

Den teoretiska analys av förutsättningarna för signalöverföring redovisas i avsnitt 4. Den visar på att frekvensen bör överstiga 1 MHz för att undvika att hela nätet blir parallellkopplat och därmed effektivt jordat. Den visar också att den använda frekvensen bör understiga 30 MHz för att undvika alltför hög dämpning samt risk för att störa annan radiokommunikation.

Överslagsberäkningar av överföringsmöjligheterna visade att en signal skulle kunna gå fram teoretiskt sett. Mot denna bakgrund utfördes mätningar hos Mälarenergi AB i Västerås vilka redovisas i avsnitt 5.

I analyskedet - och som en följd av erhållna resultat - framkom en alternativ metod (med magnetisering) för överföring av signal genom fjärrvärmerör kan erbjuda vissa möjligheter. Detta redovisas i avsnitt 6.

Analys av resultaten samt presentation av slutsatserna redovisas i avsnitt 7.

Projektet har stötts av en referensgrupp bestående av Hans Dahlbäck vid Mälarenergi AB och Jan Eliasson vid Göteborg Energi AB. Hans Dahlbäck har vidare deltagit aktivt i samband med genomgång av nätet samt mätningar i Västerås.

2 DATAÖVERFÖRING

2.1 Befintliga systemtyper

Det har tidigare nämnts att befintliga systemtyper för fjärerkommunikation för energiföretag inventerats och värderats i en tidigare FVF-rapport från 1977.[2]

I rapporten redovisas följande alternativ

- tvåtråds signalledning
- elledning
- infrarött
- radio
- koaxialkabel
- optisk fiber

Bland lösningar som beskrivs i rapporten förtjänar ett par system från Schlumberger ett särskilt omnämnande[3]:

- trådlös överföring med radiofrekvens från kunden till en lokal central och vidarebefordran med liknande metodik till fjärrvärmeleverantörren
- trådlös överföring med radiofrekvens från kunden till mätton på mobil enhet på gatan utanför

Det nämns också att Schlumbergers lösning tillämpas mest i USA där myndigheterna tillåter en tillräckligt hög signalstyrka. Frekvensen ligger kring 800 MHz - 1 GHz.

Utvecklingen går mot högre överföringshastigheter, högre frekvenser och lägre pris.

Exempelvis bildades 1998 - på initiativ av Intel och Microsoft - ett konsortium som också innefattar IBM, Toshiba, Ericsson, Nokia och Puma Technology med syfte att åstadkomma en standardisering för dataöverföring och synkronisering över korta avstånd[4]. Priset per enhet uppskattas i dag uppgå till 50 - 200 SEK. Kodnamnet är *Blue Tooth* vilket anspelar på Harald Blåtand som enade Danmark[5]¹.

¹ Harald Blåtand, d. 986 eller 987, dansk kung, son till Gorm den gamle. H. styrde, möjligen till en början som faderns medregent, ett rike med centrum i Jelling i Jylland. Ett politiskt beroende av Otto I (den store) i Tyskland bidrog troligen till hans övergång till kristendomen mellan 953 och 965. H. utsträckte efter hand sitt välde, så att det på 970-talet omfattade också östra Danmark och delar av Norge. Ca 983 lyckades han erövra landet kring Hedeby och kunde tydligen göra sig oberoende av kejsaren. H. kunde sedan i den stora Jellingstenens runinskrift förkunna, att han "vann sig hela Danmark och Norge och gjorde danerna kristna". Till sist utbröt dock ett uppror, lett av sonen Sven Tveskägg och i källorna skildrat som en kamp mellan kristen och hednisk tro. Sven segrade, medan H. flydde sårad till sin vikingaborg Jomsborg, där han kort efteråt dog.

2.2 Bredband via elnätet

System som finns för bredband på elnätet förtjänar ett särskilt omnämmande eftersom en tänkt tillämpning för fjärravläsning via rörnätet kan vara upplagd på liknande sätt - inte minst när det gäller hur man hanterar frågan om störningar samt fel i överföringen. Samtidigt är dock skillnaderna stora till följd av olikheterna i kraven på signalöverföringshastigheter.

Den konkreta överföringen på Internet[6-7] sker på fyra nivåer enligt Tabell 1.

Tabell 1. Nivåerna för överföring på Internet.

Nivå	Funktion
Länkskikt	Nedersta skiktet i hierarkin. Innefattar närverkskort och dess drivrutiner. All kommunikation måste ske genom dessa.
Nätverksskikt	Ansvarar för att datapaketet på nätverket kommer till rätt mottagare. Tar emellertid inte ansvar för att ett datapaket (kanske hundratals i ett e-postmeddelande) kommer fram och svarar därmed mot en opålitlig ("unreliable") överföring
Transportskikt	Hanterar dataflöden mellan två datorer och upprätthåller kanaler för dataströmmar. Ansvarar för att information kommer fram och gör det i rätt ordning. Erbjuder med detta pålitlig ("reliable") överföring (ser till att e-postmeddelandet kommer fram)
Applikationsskikt	Består av de programmoduler som användaren av en dator kommer i direkt kontakt med (t ex e-postprogram eller webbläsare)

Varje paket i en överföring skickas i enlighet med något protokoll (språk) och något system för adressering. På sin väg passerar det *repeaterare*, *routerar* och *bryggor* vilka säkerställer att paketen skickas vidare hela tiden.

Som datoranvändare kan det hända att man upplever att dataöverföring på nätet "strular" allt som oftast. Det som en användare ser är emellertid endast en liten bråkdel av alla de fel som förekommer. Skälet till detta är en mycket stor flexibilitet vad beträffar överföringen av varje enskilt datapaket i kombination med en effektiv övervakning av att överföringen blir korrekt (paritetskontroll).

Ascom Powerline[8,9] levererar system för bredbandsöverföring via elnätet, och tekniken introduceras för närvarande i Sverige av Sydkraft. Systemet avser egentligen överföringen närmast kunden. Överföring över större avstånd sker via optisk kabel med hög överföringskapacitet.

Egentligen är det två delsystem:

- ett utomhussystem i 1,6-13 MHz-området med en räckvidd på minst ca 300 meter (kan utökas med hjälp av slavsändare)
- ett inomhussystem i 15-30 MHz-området med en kortare räckvidd

Överföringen sker i separata frekvensband med en bredd av ca 2 MHz.

Systemet monitorerar själv överföringen kontinuerligt och väljer hela tiden de frekvensband som har minst störningar och bäst överföring. Även signalstyrkan och överföringshastigheten väljs med hänsyn till störnivå och reduktionen av signalstyrkan i ledningen. Vid fel i överföringen repeteras signalen.

Jämförelse kan göras med Telias ADSL-system - så kallat "upplevt bredband" om går via telefonledningarna - arbetar i området 0,1-1 MHz (<40 kHz för talet i telefonen). ADSL har med detta större räckvidd men lägre överföringshastighet.

3 MARKENS DIELEKTRISKA EGENSKAPER

Dielektriska egenskaper hos jordmaterial finns beskrivna ibland annat referenserna[10-13]

Eftersom stålrören omges av polyuretanskum blir inte det omgivande jordmaterialets dielektriska egenskaper dimensionerande för överföringen (cf avsnitt 4).

Det finns ändå anledning att kontrollera om litteratordata avseende lägre frekvenser kan användas vid de som är aktuella i denna rapport. En genomgång av den aktuella litteraturen[10-13] har visat att impedansen i de allra flesta fall avtar med ökad frekvens. De antaganden som gjorts i avsnitt 4 avseende de dielektriska egenskaperna är därmed konservativa.

4 TEORETISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

4.1 Frekvensområden

Valet av frekvensområde för signalens bärvåg bestäms av flera faktorer. Generellt sett är det fördelaktigt med låg frekvens för att dämpningen inte skall bli för stor. Detta gäller i synnerhet om omgivande jord utnyttjas som återledare. Problemet med störningar på annan utrustning och kommunikation blir också mindre vid lägre frekvens. Den under gränsen för lämplig frekvens bestäms sannolikt av risken för störningar från elnät, kraftelektronik och läckströmmar från elektriska järnvägar. En rimlig lägsta frekvens för bärvågen är 10 kHz (30 km våglängd). Samtidigt krävs också att frekvensen för bärvågen är större än signalens bandbredd. Kravet på bandbredd är dock mycket måttligt.

Ett problem med en sådan mycket låg frekvens är dock att hela röret svänger i fas. Våglängden är större än nätets dimensioner. Det innebär stor risk för att signalen blir mer eller mindre kortsluten av den stora mängden anslutningar och jordningspunkter. Ur elektriskt synpunkt blir nätet extremt lågohmigt. Det blir svårt att åstadkomma impedansanpassning och ”jordkontakt”.

Högre frekvens - t ex 10 MHz (30 m våglängd) - innebär att signalen utbreder sig som vågor längs röret med en för rörledningen karakteristisk impedans. Dämpningen av signalen blir större men samtidigt blir det enklare att skapa elektrisk anpassning vid sändare och mottagare.

Ytterligare högre frekvens innebär sannolikt enbart nackdelar. Dels ökar dämpningen längs ledningen med frekvensen. Dels ökar risken för störningar på annan radiokommunikation.

4.2 Datahastighet och bandbredd

För felsäker kommunikation mellan mätare och insamlingscentral krävs dubbelriktad kommunikation. Det räcker dock att ena sidan lyssnar medan den andra sänder (halv duplex)². En mätare har inte speciellt mycket information att meddela. 100 byte för identitet, mätvärden och status bör vara helt tillräckligt. Mätvärden bör inte behöva överföras oftare än kanske 2 gånger per dygn. Ett meddelande behöver knappast överföras snabbare än på 10 sekunder. Datahastigheten skulle alltså kunna vara så låg som 100 bps. För detta krävs beroende på typ av modulation en bandbredd på bara några hundra Hertz.

En liten mottagarbandbredd är en förutsättning för att tillräcklig immunitet mot störningar och brus skall erhållas.

² Mer korrekt uttryckt är kanske att alla medlemmar i nätet av mätare och central lyssnar medan en sänder.

4.3 Transmissionsbudget

För att en mottagare skall kunna uppfatta en sändare måste en transmissionsbudget uppfyllas. Det innebär helt enkelt att sändarens effekt skall vara tillräckligt stor för att övervinna dämpningen på vägen till mottagaren och att signalen där måste övervinna störningar och brus.

4.4 Sändareffekt

Eftersom de flesta värmemätare som används idag redan finns i lokaler med tillgång till det fasta elnätet är tillgång på driveffekt i sig sannolikt inget problem. Av hänsyn till komponentkostnad, elsäkerhet och ur störningssynpunkt vill man sannolikt ändå begränsa sändareffekten till kanske högst 1 W. För flera av de sk fria frekvensbanden tillåts endast 100 mW uteffekt (20 dBm).

4.5 Störnivå vid mottagare

Mottagaren, d v s både utrustningen vid mätaren och vid insamlingscentralen, är sannolikt placerad i en elektrisk miljö med mycket störningar. Störkällor kan vara varvtalsstyrda cirkulationspumpar, kontaktorer eller elmotorer för ventilreglage. Andra störkällor kan vara likspänningsaggregat, datorer och annan elektrisk utrustning. Dessutom finns det yttre störkällor t ex inducerade störningar från kraftledningar eller järnväg. Fanns inte dessa störkällor skulle mottagaren bara vara begränsad av sin egen känslighet och termiskt brus.

En ansats för att uppskatta störningsnivån är att anta en störnivå relativt det termiska bruset. Med en störnivå 40 dB över termiskt brus vid 1 kHz mottagarbandbredd blir störnivån $S = 40 + 30 - 174 = -104$ dBm.

4.6 Dämpning av signal via rörnät

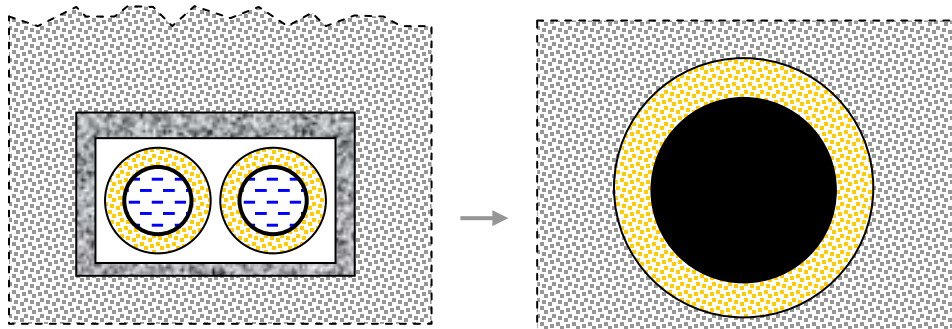
Signalens dämpning mellan mätare och central kan delas upp i ett antal delar:

- Sträckdämning längs rörledning
- Förlust p g a dålig anpassning och ”jordkontakt” (bägge ändar)
- Förluster vid ventilbrunnar p g a kortslutningar mot omgivande jord
- Förluster vid förgreningspunkter
- Reflektionsförluster
- Utstrålning av radiovågor till rymden

Av dessa är sträckdämpningen viktigast att analysera eftersom den kan befaras bli så stor att hela idén med signalöverföringen faller.

4.7 Rör i halvledande jord

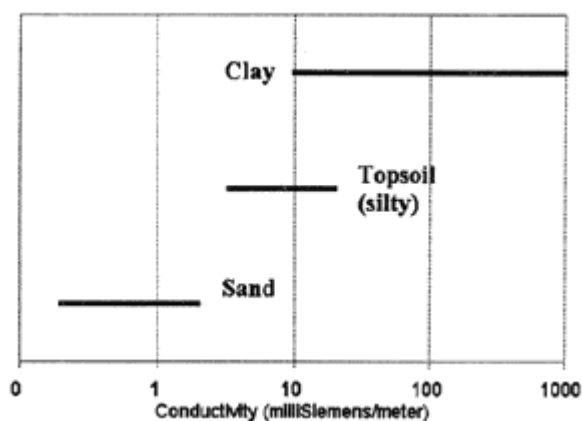
För att uppskatta sträckdämpning måste ett antal antaganden och förenklingar göras. Den första förenklingen är att efterlikna fjärrvärmeledningen med en cirkulär isolerad ledare i ett halvledande medium (fuktig jord) med oändlig tjocklek.



Figur 1. Approximation av rörledningens geometri för att förenkla det elektriska vågutbredningsproblemet.

Figure 1. Approximative cross section geometry of the district heating pipe. Simplification made in order to facilitate the calculation of the wave propagation.

Ytterledaren i denna ”koaxialkabel” kommer att utgöras av ett skikt jord. För att beräkna tjockleken och resistansen för detta skikt behövs data över jordens elektriska ledningsförmåga. Typiska värden på elektrisk konduktivitet hos jordmaterial framgår av Figur 2.



Figur 2. Konduktivitet för olika jordarter (från referens [14]).

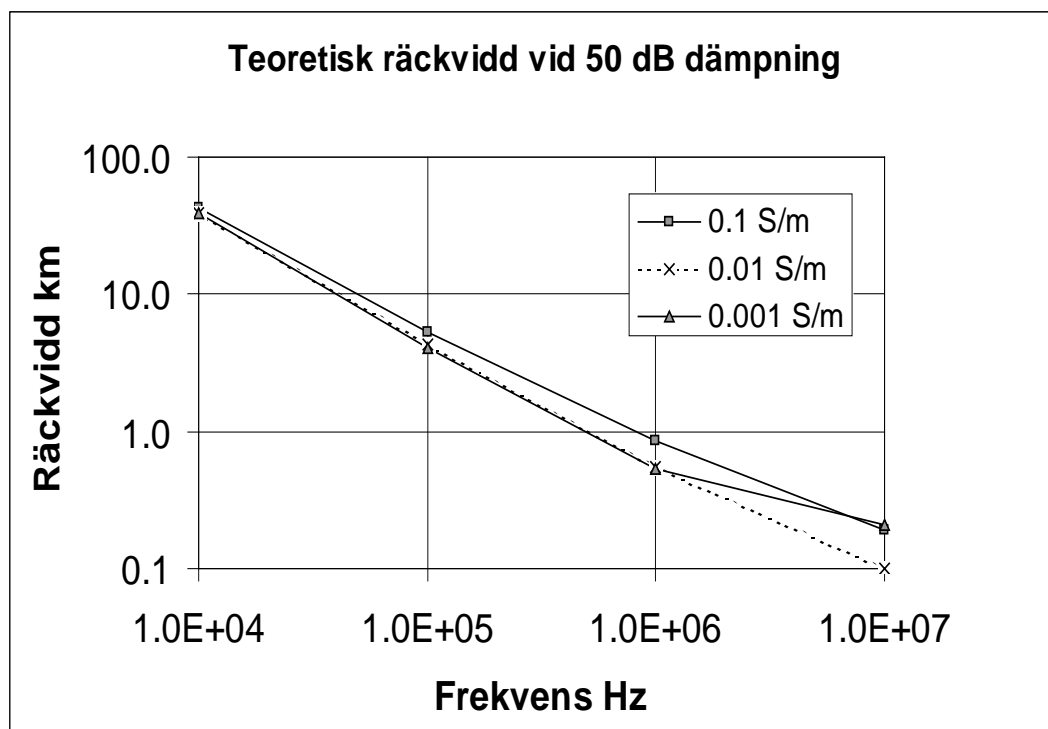
Figure 2. Electrical conductivity for different soil types (from reference [14]).

Tabell 2. Några antaganden för uppskattning av sträckdämpningen.

Frekvens	f	Hz	1.0E+04	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+07	1.0E+04	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+07	1.0E+04	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+07
Vinkelfrekvens	ω	s ⁻¹	6.3E+04	6.3E+05	6.3E+06	6.3E+07	6.3E+04	6.3E+05	6.3E+06	6.3E+07	6.3E+04	6.3E+05	6.3E+06	6.3E+07
Våglängd	λ	m	3.0E+04	3.0E+03	3.0E+02	3.0E+01	3.0E+04	3.0E+03	3.0E+02	3.0E+01	3.0E+04	3.0E+03	3.0E+02	3.0E+01
Konduktivitet	σ	S/m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.001	0.001	0.001
Rel.diel.konst.	ϵ_r		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Inträngningsdjup	δ	m	1.6E+01	5.0E+00	1.6E+00	5.1E-01	5.0E+01	1.6E+01	5.1E+00	1.8E+00	1.6E+02	5.1E+01	1.8E+01	1.1E+01
Resistans per m	R	W/m	1.1E-02	9.0E-02	5.6E-01	2.5E+00	1.2E-02	1.1E-01	8.8E-01	4.7E+00	1.2E-02	1.2E-01	9.1E-01	2.3E+00
Dämpningskonstant	α	1/m	1.3E-04	1.1E-03	6.7E-03	3.0E-02	1.5E-04	1.3E-03	1.1E-02	5.7E-02	1.5E-04	1.4E-03	1.1E-02	2.7E-02
Dämpning	L	dB/m	1.2E-03	9.4E-03	5.8E-02	2.6E-01	1.3E-03	1.2E-02	9.2E-02	5.0E-01	1.3E-03	1.2E-02	9.5E-02	2.4E-01
Räckvidd vid 50dB	x	km	42.9	5.3	0.86	0.19	39.6	4.3	0.54	0.10	38.6	4.0	0.53	0.21

Den elektriska ledningsförmågan (konduktiviteten) för jordarter kan variera högst avsevärt. För fjärrvärmeledningar i svenskt klimat är lera den sannolikt vanligaste jordarten. Om leran dessutom är mättad med vatten kan konduktiviteten bli relativt hög, kanske 0,1 Siemens/m. Undantag från detta kan vara ledningar i berg samt ledningar omgivna av sand.

Uppskattningar av sträckdämpningen för en radiofrekvent signal längs ledningen har genomförts med ett antal förenklande antaganden i Tabell 2 och Figur 3.



Figur 3. Teoretisk räckvidd för radiosignal som leds längs rörledning i mark med varierande ledningsförmåga. Beräkningen tar endast hänsyn till sträckdämpning (50 dB).

Figure 3. Theoretical range at different frequencies for a radio signal which is transmitted through a pipe in the ground. Only the simplest mechanism for attenuation is included in the calculations (50 dB), cf text..

Av figur 3 framgår att markens ledningsförmåga har liten inverkan på den teoretiska räckvidden samt att låg frekvens är fördelaktigt för lång räckvidd. Det finns dock vissa osäkerhetsmoment i beräkningarna eftersom flera förenklande antaganden³ har används. Dessutom har ingen hänsyn ännu tagits för reflexioner och förluster vid förgreningspunkter.

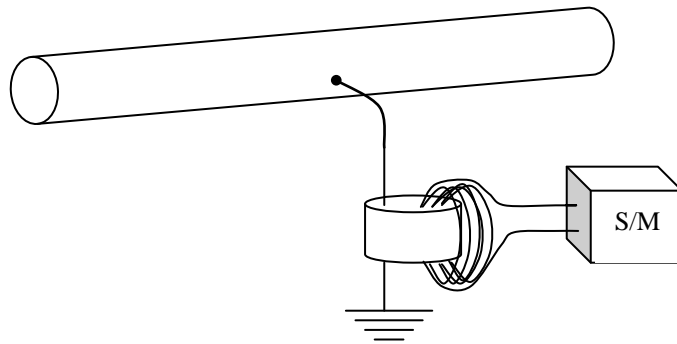
³

Inträngningsdjup har beräknats med formel som egentligen endast är giltig för plan geometri. Beräkningarna är därför osäkra vid stora inträngningsdjup.

En faktor som inte redovisas ovan är inverkan av jordens dielektricitetskonstant som har satts till 5 för alla punkter. Trots att beräkningarna tar hänsyn till denna faktor visar det sig att den har mycket liten inverkan utom vid hög frekvens och låg konduktivitet. Jämför även med avsnitt 3.

4.8 Förluster vid anslutningar

Den radiofrekventa signalen måste på något sätt matas in i rörledningen. Det kan tänkas ske på olika sätt, t ex med induktiv koppling eller med direkt anslutning. Induktiv koppling innebär troligen att hela rörledningen måste omringas med en jättelik transformator kärna av ferrit eller järnpulver, vilket knappast är realistiskt. Direkt anslutning är mer realistiskt. För detta krävs dock mycket god jordkontakt. Dessutom krävs en god impedansanpassning mellan sändare / mottagare och anslutningsledningen.



Figur 4. Direktanslutning till rörledning med jordanslutning och impedanstransformering till sändare / mottagare.

Figure 4. Direct connection to a pipe including ground connection and impedance transformation to transmitter / receiver.

Resistansen till jord kan bli ganska stor. För ett jordspett som drivs in 1 meter i mark med konduktivitet $\sigma = 0,01$ S/m uppskattas⁴ resistansen till 89 Ω .

Vid tillräckligt hög frekvens kan rörledningen elektriskt betraktas som en transmissionsledning med vågimpedans Z som uppskattas⁵ till 42 Ω . En stor del av signaleffekten kommer att förbrukas i den dåliga jordningen.

⁴ Jordspettets resistans till omgivningen uppskattas med $R = \frac{1 + \ln \frac{2l}{d}}{2\pi l \sigma} = \frac{1 + \ln \frac{2}{0.02}}{2\pi \cdot 0.01} = 89 \Omega$

⁵ Vågimpedansen uppskattas grovt med $Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{r_2}{r_1} = 60 \cdot \ln 2 = 42 \Omega$

Uttryckt i dB blir förlusten åtminstone

$$L = 20 \log \frac{Z/2}{R_{jord} + Z/2} = 20 \log \frac{21}{89 + 21} = -14 \text{ dB}$$

Till detta kommer andra förluster, t ex för impedanstransformeringen. Sannolikt blir förlusterna vid vardera ändpunkten åtminstone 20 dB.

Ett enkelt alternativ att åstadkomma jordförbindelse kan vara att utnyttja nolledare eller skyddsjord på det befintliga elnätet. Det finns dock flera osäkerhetsmoment med detta. Det är osäkert om elleverantörerna kommer att acceptera att elnätet utnyttjas på detta sätt. Vidare finns det en visserligen liten men ändå potentiell risk för störningar på annan elektrisk utrustning, t ex jordfelsbrytare. Dessutom är elnätet ofta utsatt för starka elektriska transienter och störningar.

4.9 Förluster vid förgreningspunkter och ventilbrunnar

Ur elektrisk synpunkt kan rörnätet liknas vid en mängd hopkopplade elektriska transmissionsledningar.

Dessa ledningar är sammankopplade vid ventilbrunnar och förgreningspunkter. Där finns ofta också rörledningar för luftning eller andra ändamål som går ut i omgivande jord. Dessa ledningar kommer ur elektrisk synpunkt att verka som (förhoppningsvis dåliga) kortslutningar till omgivande jord.

Vid låg frekvens blir våglängden stor i förhållande till rörnätets utbredning. Hela rörnätet blir då ur elektrisk synpunkt parallellkopplat med en stor mängd kortslutningar till jord. Att överföra en elektrisk signal via rörnätet är då inte realistiskt. Ökas frekvensen till kanske 1 MHz eller med så att våglängden blir mindre än 300 meter blir inte hela nätet parallellkopplat. En elektrisk signal kommer då att ledas längs rören till förgreningspunkterna. Vid en förgreningspunkt kommer en del av signalen att reflekteras, resten delas signalen upp mellan rörledningarna. Om en rörledning förgrenas till två ledningar med samma vågimpedans kommer teoretiskt 4/9 av effekten att gå vidare i vardera ledningen samtidigt som 1/9 reflekteras. 4/9 motsvarar en förlust på 3,5 dB. Skulle rörledningen dels upp i tre nya ledningar kommer 1/4 av effekten vidare i varje ledning vilket motsvarar 6 dB förlust.

Reflektioner eller stående vågor från t ex förgreningspunkter kan tänkas ge stora förluster för en radiovåg som leds längs rörledningen. För att dessa förluster skall ha någon betydelse måste dock själva transmissionsledningen ha små förluster. Så är inte fallet om omgivande jord utgör en del av transmissionsledningen. Sannolikt kommer i stället reflekterade vågor att snabbt dämpas ut. För en beräkning av den totala dämpningen bör det därför vara tillräckligt att beakta sträckdämpning och förluster vid förgreningspunkter.

Vid en ventilbrunn förekommer ofta rörledningar för dränage och ventilation som går ut i omgivande mark. Beroende på motståndet mot omgivande mark kommer dessa kortslutande ledningar att dämpa signalen mer eller mindre kraftigt. Hur stor del av signalen som kan passera en ventilbrunn är svårt att uppskatta. Sannolikt dämpas signalen med kanske 15 dB vid en ventilbrunn om det finns oisolerade ledningar ut i marken.

4.10 Övriga förluster

Variation i geometri eller den omgivande jordens egenskaper kan ge upphov till reflektioner och spridning av vågen. Fukt i den termiska isoleringen kan ge stora förluster. Ytterligare en förlustfaktor kan vara att radiovågen strålar ut till rymden som en antenn. Detta kan ha betydelse om rörledningen ligger nära markytan i jord som kanske är torr.

4.11 Uppskattad transmissionsbudget

En transmissionsbudget för signalering längs fjärrvärmerör kan upprättas förutsatt att ett antal antaganden kan göras för okända parametrar. Dessa antaganden gör givetvis beräkningen mycket osäker.

Följande antaganden görs i denna rapport:

- Frekvens mellan 1 – 30 MHz motsvarande våglängd 300 – 10 m. Detta medför att signalen har möjlighet att utbreda sig som våg längs rörnätet.
- Inkopplings- och anpassningsförlust vid ändpunkter 20 dB.
- 3 brunnar eller förgreningspunkter med vardera 10 dB förlust.
- Signalbandbredd 1 kHz.
- Sändareffekt 100 mW (20 dBm).
- Strörnivå över termiskt brus 40 dB (se mätresultat nedan som jämförelse).
- Sträckdämpning (10 MHz 50 - 100m i diagram ovan) 25 dB.

Uppskattning:

- Förlust vid ändpunkter	40 dB
- Förlust vid förgreningspunkter	30 dB
- Summa förluster utan sträckdämpning	70 dB
- Termiskt brus	$30 - 174 = -144$ dBm
- Störnivå (rörnät)	$40 - 144 = -104$ dBm
- Störnivå (mottagare) ⁶	$-104 + 20 = -84$ dBm
- Sändareffekt / störnivå	$20 + 84 = 104$ dB
Marginal	$104 - 95 = 9$ dB

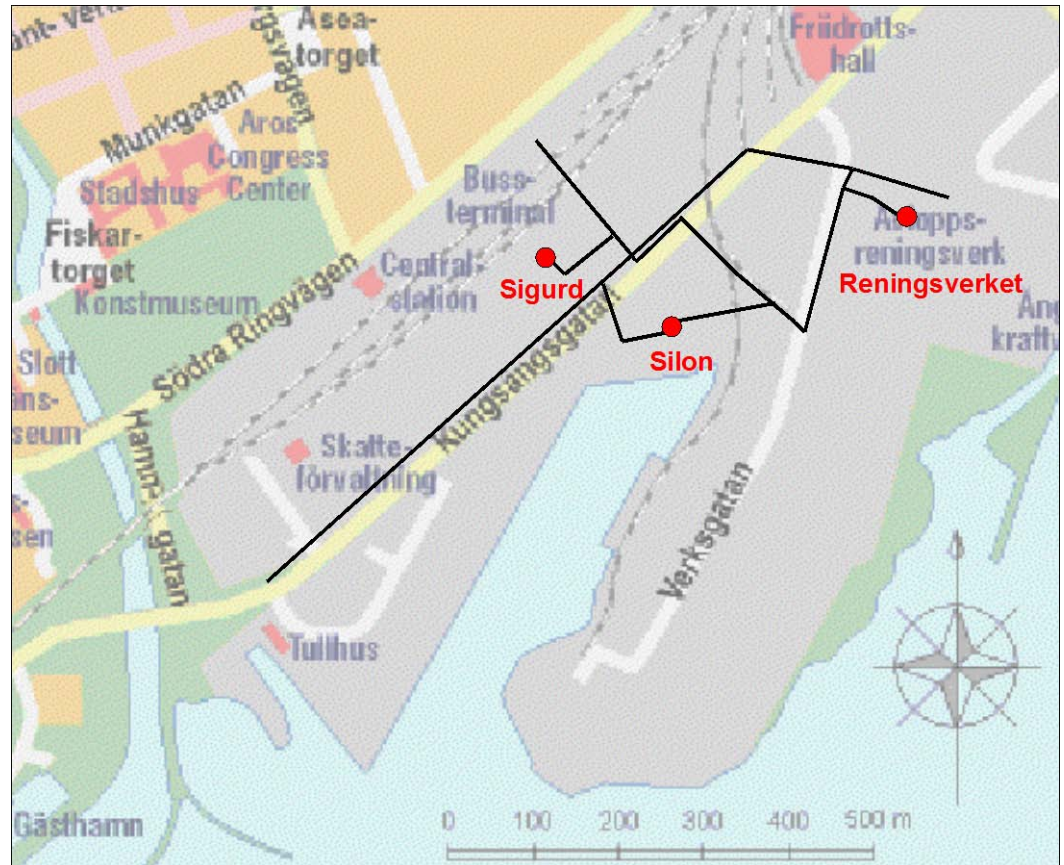
⁶ 20 dB under störnivå i rörnät pga inkopplingsförlust

Den beräknade marginalen 9 dB räcker sannolikt precis till för att mottagaren skall känna igen signalen över störningarna. Den räcker dock inte till för att täcka sträckdämpningen. Slutsatsen skulle alltså bli att det inte går eller är på gränsen till möjligt att överföra en signal. Emellertid är antagandena mycket osäkra. Slutsatsen är därför att praktiska försök är motiverade.

5 MÄTNINGAR I FJÄRRVÄRMENÄT

5.1 Utförande

Mätningar genomfördes mellan tre platser hos Mälarenergi AB i centrala Västerås, se Figur 5.



Figur 5. Mätningar mellan tre platser i centrala Västerås. Mätplatser samt en liten del av rörnätet är utritat på kartan. Avståndet i rörlängd uppskattas till ca 300 m för Sigurd – Silon respektive ca 600 m för Sigurd – Reningsverket.

Figure 5. Measurements at three positions in the central part of Västerås. The positions together with a small part of the district heating system are indicated on the map. The distance (in pipe length) is estimated to 300 meters for “Sigurd” – “Silo” and 600 meters for “Sigurd” – “Reningsverket”.

En signalgenerator placerades vid mätplatsen ”Sigurd” närmast centralstationen. Signalgeneratoren anslöts mellan elnätets skyddsjord och fjärrvärmeledningarna i fastighetens värmecentral. Signalgeneratoren amplitudmodulerades med en 10 Hz fyrkantsignal. Uteffekten⁷ var 16 dBm.

⁷ Den verkliga uteffekten var sannolikt betydligt lägre pga missanpassning.

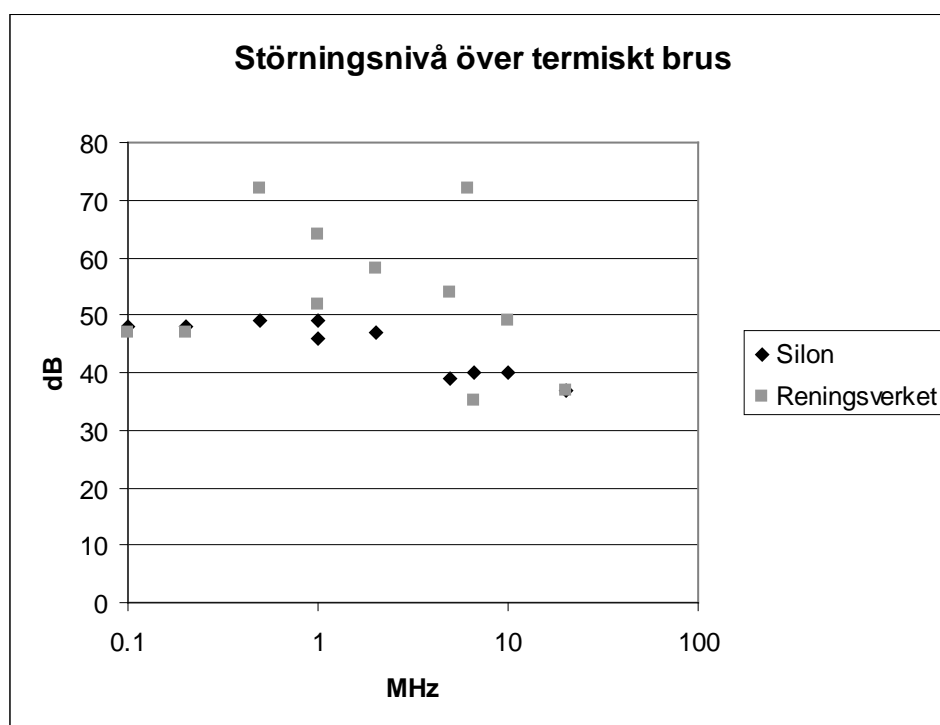
Därmed blev den enkel att känna igen på mätplatserna med en spektrumanalysator.

En spektrumanalysator placerades först nära signalgeneratoren för att verifiera mätutrustningen. Därefter flyttades den till de båda andra mätplatserna ”Silon” och ”Reningsverket”. Inkopplingen av spektrumanalysatorn gjordes också mellan fjärrvärmeledning och elnätets skyddsjord.

Mätningar utfördes först utan påslagen signalgenerator för att uppskatta störningsnivån. Därefter utfördes mätningar vid ett antal valda frekvenser varvid eventuell igenkänd signalstyrka noterades.

5.2 Resultat

Störningsnivån visade sig i de flesta fall ligga högre än antagandet ovan på 40 dB över termiskt brus, se Figur 6.



Figur 6. Uppmätta störningsnivåer vid mätplatserna Silon och Reningsverket.

Figure 6. Measured disturbances levels at the measuring positions ”Silo” and ”Reningsverket”.

Vid låga frekvenser (utanför frekvensskalan i Figur 6) var störningsnivån betydligt högre. Detta gällde speciellt för mätplatsen Sigurd som låg nära Centralstationen. Här fanns elektriska transienter (från tågtrafik?) som var så

kraftiga att det inbyggda skyddet mot reflekterad effekt vid flera tillfällen stängde av signalgeneratoren.

Signalöverföring från Sigurd till Silon fungerade väl⁸ vid ett antal av de slumpvis provade frekvenserna, se Tabell 3.

Tabell 3. Resultat från fältmätningar. Signalöverföring från Sigurd till Silon.

Frekvens MHz	Fungerar?
1,1	nej
5	nej
7	dåligt
8	ja
9	ja
12	nej (störd)
12,1	ja
20	nej
31	nej

Mellan Sigurd och Reningsverket erhöles först ingen kontakt. Plötsligt observerades dock en svag signal vid 8,5 MHz. Noggrannare försök vid flera frekvenser visade att det fanns ett smalt frekvensband mellan 8,5 – 8,9 MHz där en användbar signal kom fram.

5.3 Slutsatser från mätningarna

Från mätningarna drogs följande slutsatser:

- Grundprincipen att sända signal via rörnätet fungerar.
- Elnätet kan sannolikt utnyttjas som jordanslutning.
- Räckvidd på ca 600 meter har bekräftats.
- Störningsnivån kan vara hög och medföra problem för utrustningen.
- Det kan vara svårt att finna användbara frekvenser.
- Mätningarna bekräftar antagandena från beräkningarna att användbara frekvenser ligger i ett område mellan kanske 1 – 30 MHz.

⁸ Med väl avses att signalnivån oftast översteg störningsnivån med 10 dB.

6 ALTERNATIV METOD MED MAGNETISERING

En av de springande punkterna i vad som kommit fram ovan är att det av "jordningsskäl" visade sig lämpligt att gå upp till så hög frekvens som minst 1 MHz. Därmed minskade också marginalerna för signalstyrkan och ökade känsligheten för störningar.

Att i stället arbeta med magnetfält skulle ändra på detta förhållande.

Antag att spolar anbringas runt fjärrvärmerör i två punkter på ett avstånd av ett antal hundra meter. Antag vidare att rören är av stål som har hyggliga - men inte goda - mjukmagnetiska egenskaper. Antag vidare att rören vid spolarna förbundits med varandra så att en sluten magnetisk krets bildats.

Uppställningen kan liknas vid den från olika läroböckerböcker i fysik välkända toroiden[15] (ringformad magnetkärna) vars induktans är proportionell mot bland annat inversen av längden. En viktig skillnad föreligger emellertid genom att magnetkärnan i fysikboken omges av lindning i hela sin utsträckning.

Om ström förs genom den ena spolen kommer röret att magnetiseras, och en ström att induceras i den andra spolen. Detta kan tänkas utgöra grunden för en signalöverföring.

Läckage av magnetfält kan förutses, men "jordning" av magnetiskt flöde kommer inte att ske eftersom utstickande material är ferromagnetiskt endast i mindre utsträckning och omgivningen knappast alls. Däremot är skillnaden i genomsläpplighet för magnetiskt fält (d v s mellan stålrör och omgivande isolering och jord) inte alls lika stor som skillnaden i elektrisk ledningsförmåga (mellan stålrör och omgivande isolering). Därför kommer magnetiskt fält att läcka till omgivningen längs hela rörets utsträckning.

Några egentliga beräkningar av detta har inte utförts inom ramen för projektet. Det bedöms ändå som tveksamt om det (av detta skäl) kulle gå att detektera något magnetiskt fält i "mottagarspolen".

Om systemet ändå skulle fungera så kommer det att vara vid låga frekvenser p g a virvelströmsdämpning. Alternativt kan man säga att behovet av effekt för en viss magnetisering kan visa sig bli oöverstigligt utom vid låga frekvenser.

7 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

7.1 Växelström

Utförda försök och studier har indikerat att förutsättningar kan föreligga för fjärravläsning med hjälp av radiofrekvent växelström genom fjärrvärmerören. Inga enskilda diskriminerande faktorer har kunnat identifieras.

Slutsatsen är trots detta att fortsatta utvecklingsinsatser inte rekommenderas. Skälet för detta är som följer.

Även om inte någon enskild diskriminerande omständighet identifierats så har ett antal potentiella komplikationer påträffats. Flera av dessa bedöms vara av relativt svårbemästrad karaktär:

- Marginalen för att få fram signalen är låg. Starkt varierande förutsättningar kan förväntas. Möjligheterna att förstärka signalen på vägen är starkt begränsade och skulle leda till ökad komplexitet.
- Bakgrundnivån är hög och kan antas variera. Särkilda föranstaltningar kan behöva göras i de fall nivån blir hög (anläggningsdel, tid, frekvensområde). Sådana kan vara svåra att göra och leder till ökad komplexitet.
- Miljön med avseende på fukt och temperatur kan vara svårbemästrad. Tillgången till elförsörjning ute i nätet kan också innebära viss svårighet.
- Tillämpningen blir speciell. Utvecklingskostnaderna (inklusive produktionsutvecklingskostnaderna) kommer att behöva betalas av en begränsad volym användning.

Författarnas bedömning är att om det handlat om att hantera en eller två av ovanstående trösklar så kanske fortsatta insatser skulle kunna vara motiverade. Att samtidigt komma tillrätta med flera negativa omständigheter bedöms innebära att sannolikheten för framgång blir låg eller i vart fall måttlig.

7.2 Magnetisering

Beträffande alternativet magnetisering har varken beräkningar eller mätningar utförts. Det är därför inte möjligt att på nuvarande stadium utesluta att metoden skulle kunna vara möjlig att tillämpa. Vidare kunde tnyttjande av låga frekvenser i och för sig svara mot utgångstanken med överföring av signal genom fjärrvärmerören.

Författarna bedömer det ändå som tveksamt om metoden för informationsöverföring skulle fungera någon längre sträcka på grund av läckage av magnetisk fältstyrka. Det är också tänkbart att användbar frekvens kan komma att visa sig vara alltför låg för den aktuella tillämpningen (och kravet på informationsöverföringshastighet).

Vidare är tillämpningen väsentligt mera speciell än den för växelström ovan, och innebär samma problem med miljön för elektronik.

Det sammantagna bedömningen blir därför att ingen rekommendation kan lämnas till fortsatta insatser.

8 REFERENSER

- 1 **Bjurström H**
Strömförsörjning till värmemätare. Fjärrvärmeföreningen FoU 2000:48.
- 2 **Arkesten K, Ekström G, Hamman C, Hjelmér S, Romvall S och Österlind B**
Fjärrkommunikation för energiföretag. Svenska Fjärrvärmeföreningen, april 1977.
- 3 Schlumbergers hemsida.
<http://www.slb.com/utilities/technologysolutions/RTEM/software.html>
- 4 *Mobileinfo.* <http://www.mobileinfo.com/Bluetooth/index.htm>
- 5 *Nationalencyklopedin.* Version 2.0 publicerad augusti 1998 CD-ROM för PC. Bokförlaget Bra Böcker AB. ISBN: 91-7133-486-6.
<http://www.nationalencyklopedin.com>.
- 6 **Gunnarson G**
Internetboken. Pagina Förlags AB, 1997. ISBN 91-636-0436-1.
- 7 **Rasmusson B**
Internet. Libris media data, 1999. ISBN 91-88948-17-X.
- 8 Ascom Powerline Communications. Power System Description, version 1.0.
- 9 **Kaltenschnee T**
Powerline Communications for Broadband Access. Ascom Power Line Communications AG.
- 10 **Summer J S**
Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier, 1976.
- 11 **Mitchell J K**
Fundamentals of soil behaviour. John Wiley & Sons Inc, 1993. ISBN 0-471-85640-1.
- 12 **Macdonald J R**
Impedance spectroscopy. John Wiley & Sons Inc, 1987. ISBN 0-471-83122-0.
- 13 **Arevirus A**
Elektrokinetisk monitorering av syntetiska lergeomembran. Kungliga Tekniska Högskolan. Examensarbete TRITA-KET-IM 2001:16.
- 14 Veris Technologies. <http://www.veristech.com/faq.htm>

- 15 Weidner R T and Sells R L**
Elementary Classical Physics, Volume 2. Allyn and Bacon, 1962.