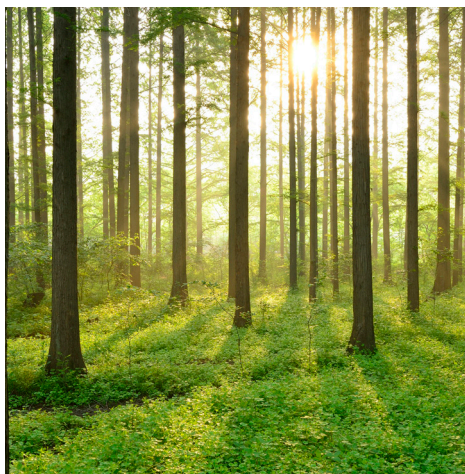


DIMENSIONERING AV SERVISLEDNINGAR I DISTRIBUTIONSSYSTEM

RAPPORT 2021:813



 FUTUREHEAT



 Energiforsk

Dimensionering av servisedningar i distributionssystem

KRISTIN ÅKERLUND
THOMAS NORDIN
OLLE PENTTINEN

ISBN 978-91-7673-813-9 | © Energiforsk Oktober 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Det här projektet utmanar rådande branschpraxis för dimensionering av servisledningar som legat till grund för dimensioneringsarbetet under lång tid. I projektet förordas ett mer dynamiskt förhållningssätt vid dimensionering och ett digitalt verktyg för att underlätta val av dimension på servisledningar vid projektering har tagits fram. Att ha ett fjärrvärmenät som är korrekt dimensionerat är viktigt ur ett resurs- och miljömässigt, ekonomiskt och funktionellt perspektiv.

Projektet har letts och genomförts av Kristin Åkerlund tillsammans med kollegan Thomas Nordin från FVB Sverige och Olle Penttinen på RISE Research Institute of Sweden.

En referensgrupp bestående av Dan Bruhn, Jönköping Energi (sammanhållande); Linda Ekman Johansson, E.ON Energilösningar; Johan Wickert, Jönköping Energi; Per Örvind, Eskilstuna Strängnäs Energi & Miljö och Niclas Wiklund, Gävle Energi har följt och kvalitetssäkrat projektet.

Projektet ingår i programmet Futureheat vars långsiktiga mål är att bidra till visionen om ett hållbart uppvärmningssystem med framgångsrika företag som utnyttjar nya tekniska möjligheter och där de samhällsinvesteringar som gjorts i fjärrvärme- och fjärrkyla tas till vara på bästa sätt. Detta projekt ingår i programmets andra etapp.

Programmet leds av en styrgrupp bestående av Jonas Cognell, Göteborg Energi (ordförande); Anders Moritz, Tekniska verken i Linköping; Anna Hinderson, Vattenfall AB; Charlotte Tengborg, E.ON Värme Sverige; Fabian Levihn, Stockholm Exergi; Holger Feurstein, Krafteringen; Dan Bruhn, Jönköping Energi; Patrik Grönbeck, Borlänge Energi; Leif Bodinson, Söderenergi; Lena Olsson Ingvarson, Mölndal Energi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft; Niklas Lindmark, Gävle Energi; Per Örvind, Eskilstuna Strängnäs Energi & Miljö; Petra Nilsson, Växjö Energi; Staffan Stymne, Norrenergi; Stefan Hjärtstam, Borås Energi och Miljö; Svante Carlsson, Skellefteå Kraft; Ulf Lindquist, Jämtkraft och Julia Kuylenstierna (adjungerande), Energiforsk.

Suppleanter utgörs av Ann Britt Larsson, Tekniska verken i Linköping; och Peter Rosenkvist, Gävle Energi..

Julia Kuylenstierna, programansvarig FutureHeat

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Författarens förord

Vi som har genomfört projektet vill rikta ett tack till:

Alla nätägare som tagit sig tid att svara på enkäten och Energiföretagen som hjälpte oss att nå ut med enkäten till nätägarna.

Paavo Persaud, Jensen AB, P-O Andersson Logstor, Jan Zetterberg, Vattenfall, Göran Johansson, tidigare anställd på Powerpipe som delat med sig av sin kunskap och sina erfarenheter.

Projektets referensgrupp, Dan Bruhn, Johan Wickert, Linda Ekman Johansson, Niclas Wiklund, Per Örvind, och Julia Kuylenstierna, har hjälpt oss att kvalitetssäkra projektet genom diskussioner och beslut om rapportens innehåll.

Kristin Åkerlund, Thomas Nordin och Olle Penttinen

Sammanfattning

En sedan länge vedertagen branschpraxis är att man håller sig under en flödes hastighet på 1 m/s och ett tryckfall på 100 Pa/m i servisledningar. Denna praxis börjar dock ifrågasättas och med ett mer dynamiskt förhållningssätt till systemdimensionering kan fjärrvärmens konkurrenskraft öka.

I detta projekt har en litteraturstudie genomförts angående nuvarande branschpraxis samt fakta om dimensionering, ljud och invändiga skador. Relativt stor vikt har lagts vid relaterade begrepp som strömning/tryckfall, kavitation och korrosion för att förklara de bakomliggande orsakerna till att ljud och inre skador uppstår. Nätägare har besvarat en enkät angående ljud och invändiga skador. Material och tjänsteleverantörer har intervjuats i syfte att få en mer djupgående bild av sambandet mellan ljud och flödes hastighet/tryckfall och var i näten ljud uppstår. Leverantörerna har också delat med sig av erfarenheter kring inre skador. Vibrationsmätningar har utförts på sex olika medierör (olika material och dimension), samt två olika varmhållningsventiler i laboratoriemiljö. En guide för dimensionering av servisledningar har tagits fram.

Det kan fastslås att dagens branschpraxis på 100 Pa/m inte är relaterat till risken för att oljud ska uppstå i systemet. Det är snarare en säkerhetsmarginal för att undvika alltför stora tryckfall i nätet, vilket kan påverka förmågan att upprätthålla differenstrycket. Vid 1 m/s är det inte heller servisledningarna själva som ger upphov till oljud även om tryckfallet är ganska stort för små ledningar. Ljud uppstår vanligtvis i komponenter i ledningsnätet som reducerar den effektiva tvärsnittsarean, i enkätundersökningen refereras det till styr- och varmhållningsventiler. Från mätningarna noteras en stor skillnad mellan varmhållningsventiler med olika design. Har man inte rådighet över dessa rekommenderas ett maximalt differenstryck på 2 bar. Vid mätningarna noterades inga störande ljudnivåer under en flödes hastighet på 1,5 m/s för de undersökta serviserna. Utifrån litteraturstudien har vi hittat rekommenderade maxhastigheter av 2 m/s för koppar- samt 3 m/s för stålrör, från andra tekniker, som används som en riktlinje för att reducera risken för erosion.

Baserat på projektets slutsatser har ett digitalt verktyg slutligen implementerats för att underlätta val av dimension på servisledningar vid projektering.

Klart är att ett mer dynamiskt sätt att dimensionera servisledningar är det mest optimala, jämfört med att använda branschpraxis, där dimension på servisledning anpassas och bestäms av den flödes hastighet och det tryckfall som nås genom viktning av de påverkande faktorerna i denna rapports guide för dimensionering av servisledningar. Ledningsdimensionen anpassas på så vis till ledningens lokala/aktuella förutsättningar.

Summary

A long-established industry practice is to stay below a flow rate of 1 m / s and a pressure drop of 100 Pa / m in service pipes. However, this practice is beginning to be questioned and with a more dynamic approach to system dimensioning, the competitiveness of district heating can increase.

In this project, a literature study has been performed regarding current industry practice as well as facts about dimensioning, sound, and internal damage. A relatively great emphasis has been placed on related concepts such as flow/pressure drop, cavitation and corrosion to explain the underlying causes of noise and internal damage. District heating network owners have responded to a survey regarding noise and internal damage. Material- and service providers have been interviewed to get a more in-depth picture of the relationship between sound and flow velocity / pressure drop. The suppliers have also shared their experiences of sound sources and of internal damage within the district heating networks. Vibration measurements have been performed on six different service pipes (different materials and dimensions), as well as two different thermostatic bypass valves in a laboratory environment. A dimensioning guide for service pipes has been produced.

It can be stated that current industry practice of 100 Pa/m is not related to the risk of noise in the system. Rather, it is a safety margin to avoid excessive pressure drops in the network, which can affect the ability to maintain the differential pressure. At 1 m/s, it is also not the service lines themselves that give rise to noise even though the pressure drop is rather large for small dimensions. Noise usually occurs in components in the pipe network that reduce the effective cross-sectional area. Network owners refer to control- and thermostatic bypass valves in the survey. From the measurements, a large difference is noted between different makes of thermostatic bypass valves. If the network owner doesn't own the pypass valve, a maximum differential pressure of 2 bar is recommended. During the measurements, no disturbing noise levels were noted below a flow velocity of 1.5 m / s for the examined pipes. Based on the literature study, we have found recommended maximum speeds of 2 m/s for copper and 3 m/s for steel pipes, from other techniques, which are used as a guideline to reduce the risk of erosion.

Based on the project's conclusions, a digital tool has finally been implemented to facilitate the choice of dimension on service lines during design.

A more dynamic method of dimensioning service pipes is the most optimal, compared to using the industry practice. Dimensioning of service pipes should be adapted and determined by the flow rate and the pressure drop achieved by weighting the influencing factors listed in this report.

Extended summary

Background

A long-established industry practice is to stay below a flow rate of 1 m/s and a pressure drop of 100 Pa/m in service pipes. The purpose is to avoid reduced comfort for customers due to high noise levels and increased wear on components.

However, this practice is beginning to be questioned and with a more dynamic approach to system dimensioning, investments in distribution lines, heat losses and the use of natural resources will be reduced. In the long run, the competitiveness of district heating will increase.

The purpose of the project is to review and question industry practice for pipe dimensioning to optimize the dimensioning of service pipes. The aim of the project is to investigate where the practical limits are regarding maximum and minimum flow rates in service pipes in the current distribution system for district heating, without the risk of reduction of comfort for the customer (related to noise) or internal damage to the district heating pipes.

The project consists of a literature study, a survey among network owners, interviews of measurement technology providers and product suppliers in the district heating sector. It also consists of experiments in a laboratory environment.

This project was initiated and funded by Futureheat.

Literature study

The project was initiated with a literature study. It includes an overview of factors that affect sizing, how velocity relates to pressure drops, causes of noise and how it propagates. Risks of internal damage due to particles that cause erosion at high flow rates and sludge formation at low velocities as well as a study on water quality have been compiled from reviewed reports. This theoretical delimitation was made when the project time was too short to perform accelerated measurements with a reliable result.

The current practice for flow velocity in district heating pipes can originate from Värmekulverthandbok (Maurin, Värmekulverthandbok, 1986). There, values regarded as optimal flow rates are listed to support successful dimensioning. These optimal flow velocities are based on the cost level of the components in the district heating system (pipes, pumps and production plants) and operation (fuel and pump energy). Pipe suppliers of today seem to declare maximum flow velocities in the same order of magnitude. The cost levels on which the Värmekulverthandbok bases the optimal flow velocities vary both between different systems and within the same system over time. This means that it is difficult to specify a fixed optimal velocity because it should also vary. In addition, the cost levels are 35 years old. The recommended velocities give pressure drops which are significantly higher than the prevailing industry practice, at 100 Pa / m at small dimensions.

We can assume that there is almost always turbulent flow in district heating systems. Turbulence is positive from a heat transfer perspective, as it will be improved. An increased transfer of heat is a good feature in e.g. heat exchangers. The disadvantage is that a turbulent flow has a larger pressure drop than a laminar one.

The surface roughness of the pipe wall affects the pressure drop in the pipe. We have compared the pressure drop at similar dimensions for three different pipe materials (steel, steel flex and copper flex). The same pipe types which have been subjects for testing in a laboratory environment. It appears that the surface roughness in copper flex is lowest, which results in less pressure losses. It must be highlighted that the surface roughness is affected by, for example, depositions that arise in the district heating system, which means that it varies from pipe to pipe and that the variation in surface roughness in an arbitrary pipe can be considered relatively large. A higher temperature results in a lower pressure drop along the pipe as the density of the medium decreases with increasing temperature. The pressure drop decrease at rising temperature is greater at small dimensions and negligible at large. An interesting factor regarding the theoretical temperature dependence is that smoother pipes are affected more by a temperature change than pipes with a coarser surface structure. It can be deduced via the Darcy-Weisbach equation (Brown, 2002). Hence in absolute numbers the pressure drop is smaller for copper flex vs steel flex, but the reduction related to an increase in temperature is larger for copper flex.

Sound exists everywhere in our environment. Some are perceived as pleasant while we prefer to avoid others. Unwanted and disturbing sound is referred to as noise. Noise affects us psychologically but also physically. Therefore, there are several requirements regarding protection against noise. The Planning and Building Act (Swedish Parliament, 2010) states that a building must be designed and constructed in such a way that noise, which is perceived by users or other people in the vicinity of the building, is at a level that does not entail an unacceptable risk for the health of these people. The noise levels should be kept low enough to enable sleep, rest and work under satisfactory conditions. This means that for a network owner there is an obligation to ensure that the district heating network does not generate unwanted noise of that magnitude. A distinction is made between airborne sound, liquid-borne sound and structure-borne sound that propagates in solid materials. Fortunately, the speed of sound is significantly lower in air than in liquids and solid materials, which means that much of the sound generated in district heating networks is reflected at the interface between the pipe and the air, hence it is carried away along the pipe from the component from which it originated. The majority of the energy will never reach the human ear. Sound can be generated in different ways, for example by pumps, valves, turbulence and cavitation.

To some extent, direct sound from the pipes can be attenuated by insulation, but it is primarily a matter of attenuating the oscillations in the pipe to avoid the sound waves being transmitted to the surrounding air. Structure-borne noise can often be a major problem. Larger vibrating surfaces, such as walls, then act as speakers. The magnitude of the structure-borne sound is strongly dependent on the construction

of the pipe attachment, to walls, ceilings etc. Vibration-damping attachments work well in heavier walls and floors, while it can be difficult to avoid noise in lighter constructions.

In the literature study, we have placed great emphasis on cavitation. Cavitation is a physical phenomenon that occurs when the pressure level in a flowing liquid locally falls below its evaporation pressure. The evaporation pressure of 100 °C water corresponds to our atmospheric pressure. In a district heating system with temperatures of 120 °C, the pressure needs to be raised by about 100 kPa from atmospheric pressure to avoid boiling. We use the unit meter water column (mVc) to more easily relate to height changes in the pipe network. 100 kPa corresponds to about 10 mVc. The evaporation pressure is thus a temperature-dependent parameter. A local pressure drop can occur in a component that reduces the effective cross-sectional area of a pipe, for example in a valve or in a pump.

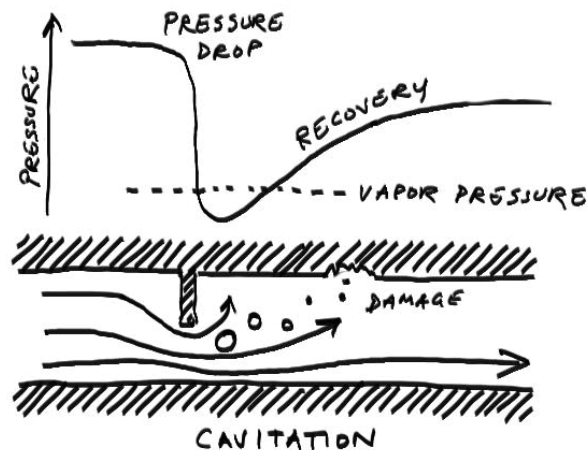


Figure 1 . Cavitation in connection with reduction of the cross-sectional area of the flow (usually in pumps or valves)

During cavitation, bubbles are formed. When they implode, pressure shocks are generated which give rise to noise and in the worst-case damage in adjacent areas. The risk of cavitation is greatest where the pressure is lowest. To avoid cavitation in pumps, the term Net Positive Suction Head (NPSH) is used. A distinction is made between available NPSHa which describes the system where the pump is to be connected and required NPSHr which is a pump-specific parameter.

$$NPSHa \geq NPSHr + \text{marginal} \quad (1)$$

A margin of the order of 1.5 m of liquid column is usually chosen. The value is used as a safety level for the suction pressure, to avoid cavitation. To avoid cavitation, you can lower the temperature, adjust the differential pressure or increase the system pressure. Increasing the system pressure in a district heating system is necessary to ensure that the pressure level is maintained between the lower boiling limit and the upper pressure limit in the entire district heating system. The pressure level in a closed district heating system, if expressed

in mV_c , can be made independent of the ground profile. Only the pressure drop due to mass flow and friction affects the pressure altitude curve.

There is a difference between the risk of cavitation and the cavitation intensity. The risk increases with rising temperature, while laboratory experiments have shown that the cavitation intensity is highest just above 30 ° C due to the balance between external pressure, internal pressure and the proportion of steam in the cavitation bubbles. (Kewen Peng, 2020). This is interesting regarding the ongoing discussion on low temperature systems. There is also a Swedish study that indicates that the cavitation intensity in valves is affected by the degree of opening of the valve. But it shows the surprising result that high opening degrees in combination with high differential pressures and high temperatures are favorable for cavitation. (Johansson, 2012) There is thus nothing to suggest that the subject of cavitation has been exhausted in terms of further research.

Corrosion is a chemical reaction between a material and the surrounding environment. A material, usually a metal, dissolves into a more stable form such as oxides, hydroxides and sulfides. The reason why corrosion occurs in metals at all is due to their manufacturing process. The strong supply of energy during production means that the pure metallic state is not stable. The metals strive to transform into the shapes they usually occur in naturally. (Storesund, 2015; Korrosionsgruppen, 2019). There are numerous types of corrosion, some more commonly used in district heating than others, but the basic requirement is for corrosion to occur is that there is a potential difference, that there is a presence of oxygen and that the water has a high conductivity. In addition, it is also affected by pH, but there the dependence looks different depending on the material. The report goes through different types of corrosion such as; general and galvanic, point- and crevice corrosion, microbial, stress-, fatigue- and deposition corrosion. As with point- and crevice corrosion, a cell with a low oxygen content, a high concentration of chloride ions and a low pH can be formed under deposits on, for example, pipe walls. Experience from copper pipes in water utilities says that problems caused by deposits are quite unusual (Vinka, 2003). Hence, the risk of internal damage at low flow rates due to deposition corrosion should be almost non-existent in district heating systems with good water quality.

In addition to the underlying cause which differs between corrosion types the corrosion processes in themselves show great similarities. The higher the potential difference and the smaller the surface that has a negative corrosion potential (the one that corrodes), the faster the process. Regardless of the material, corrosion in a district heating system can be minimized by complying with the following basic requirements:

- A low oxygen content gives a low corrosion rate
- A low conductivity (salinity) gives a low conductivity which in turn gives a low corrosion rate.
- A basic pH value. At high pH values, oxygen-consuming corrosion occurs, which is preferable to hydrogen-evolving corrosion that occurs at low pH.

However, some metals have a relatively high corrosion rate even at high pH, such as aluminum, zinc, tin and lead.

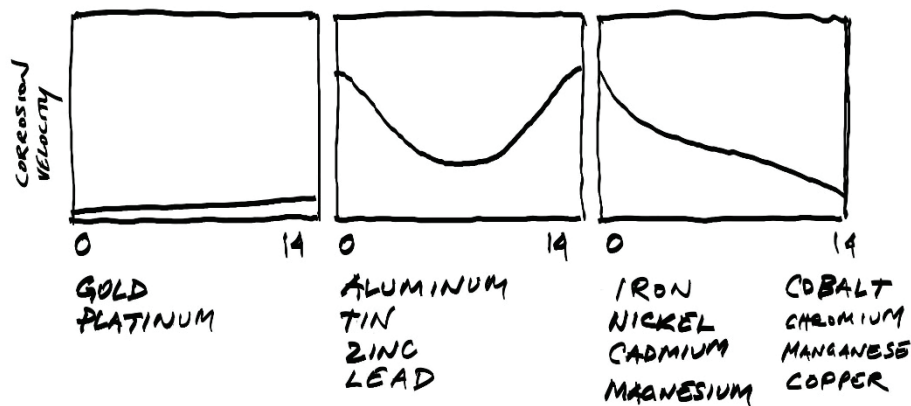


Figure 2. Relationship between corrosion rate and pH for different metals
(Alström, Slutna kyl- och värmesystem, 2019)

In Figure it is shown that Zinc has a tendency to corrode at high pH. Zinc is therefore leached from brass components. The consequence of too high pH levels thus mean that, control valves in district heating, which can be made of brass, are gradually dissolved. (Underhållsgruppen, Svensk Fjärrvärme, 2015). We also note that recommended pH levels differ in different studies. The reason for this may be that their recommendations apply to different types of systems. One study focuses on nuclear power plants (Aghili, 1999) while another deals with the recommended pH for drinking water pipes (Vinka, 2003). The water quality needs to be adjusted to the current system.

It has been mentioned that the conductivity in the water affects the corrosion rate, but there is also a flow dependence related to this. A study of corrosion rate on stainless steel pipes (Li, Zhang, & Cheng, 2017) showed that the corrosion rate increased between 0-10 m/s. The medium was water with 3.5% NaCl to accelerate the corrosion process. The conclusion was that the flow velocity affects ion transport next to the pipe wall and thus also the corrosion rate.

Sources of oxygen (air) leakage into a district heating system can e.g. be filling with non-degassed water, open expansion vessels or accumulator tanks, leakage via substations with higher secondary pressures than primary or rapid filling with a fire hose (Hellman, 2015). According to Aghili (Aghili, 1999) the solubility of magnetite reaches a maximum in water with less than 3 ppb O_2 at about 100 ° C. Only when the oxygen content exceeds 15 ppb O_2 is the build-up of a completely protective magnetite layer and an effective reduction of the iron content in the liquid possible. Similar findings are reported by other researchers (Uhlig & Revie, 2008) at other O_2 levels, which indicates the need to be well informed regarding oxygen.

The content of solid particles should be as low as possible to avoid clogging and erosion. When designing, it is important to design the structure in a way that reduces the risk of erosion or clogging due to particles. This may, for example,

apply to flow-affecting details or the design of branches where under-crossing branches are to be avoided.

Survey

In Sweden, there are about 200 district heating companies that own district heating networks in different locations. These network owners have many years of experience regarding problems with noise, particles and internal damage in the distribution networks. A survey of their experiences was conducted. To get as many respondents as possible, we received help from Energiföretagen to reach the network owners via their communication channels, such as their newsletter and by direct email to several people within the companies. The project group also interviewed several network owners directly.

The result regarding noise in the district heating networks was, as expected, that it is in villas that problems with noise are first and foremost noticed. Of the 25 respondents, 20 stated that sound problems occurred in villas. There were also three respondents with sound problems in multi-family houses, one with sound in a public room and one who answered that the sound could be located elsewhere. Of those participating in the survey, 68% experienced problems in a district heating plant, 16% in a service pipe and 16% stated that the problem had occurred elsewhere. The components in the district heating plant that cause problems in addition to circulation pumps were found in this study to be the control valves for domestic hot water (41%), possible bypass / bypass valve (24%), and control valves for the heating circuit (23%). One can thus conclude from these survey responses that it is primarily the valves that cause noise in the heating system and not the service pipe itself. Regarding internal damage, it is possible to see a slight connection between particles and internal damage as 83% of the district heating networks with internal damage have a water that contains particles. On the other hand, it is not fully established to what degree particles cause internal damage, as 61.5% of district heating networks without internal damage also have water that contains particles.

Supplier interviews

Material suppliers and service providers have many years of experience regarding the problems of noise, particles and internal damage in the distribution networks. Their experiences have been mapped through interviews and compiled in this section. This section thus reveals a compilation of the suppliers' own experiences. The project group has not filtered or thoroughly investigated the accuracy of its content.

When we interviewed both service and material suppliers, the experiences differ. One of the interviewees talk about a clear ascending scale where the primary heating pipes are normally the quietest systems with a minimum of noise. Experience from another interviewee says that noise in service pipes is unusual. But that when noise occurs, it often occurs in main pipes at flow velocities > 2 m/s. A common perception, however, is that the noise increase by the flow velocity.

Self-oscillations / resonant sounds are more common in copper pipes. In copper flex pipes, sometimes acoustic phenomena with audible tones appear,

probably due to the softer material compared to steel. Dimensional changes, branches and expansion bends may be sources of noise but are normally surprisingly quiet. It happens, however, that resonant sounds that occur after 90 ° and 45 ° bend propagate into houses. Expansion of fixed systems takes place in a slip-sticking movement, which causes the pipe to "jump" and then come at rest in a new position. As a result, expansion movements can be very loud. This means that correctly designed expansion-absorbing solutions and wall penetrations are important. Pumps, especially booster pumps, can sometimes be heard. A ball valve that cannot be fully opened sounds a lot at high flows. The reason why a butterfly valve does not sound in an open position is assumed to be due to the disc being in the middle of the flow. When drilling, the fitter can, when plugging the valve stem of the drilling valve, influence its position so that the ball valve closes slightly. This unintentional choking can both cause noise and limit delivery capacity. The same course of events can occur with so-called disposable valves. Circuits, with greatly reduced dimensional changes, often make a lot of noise that propagate far, up to 200 m from the sound source.

Regarding internal damage, one of the providers said that copper pipes have a lower maximum velocity than steel, because copper is soft and more sensitive for erosion. At high velocities there is a risk of erosion of the bends. Sludge with copper shavings in a pocket causes galvanic corrosion and the copper shavings will penetrate through the pipe. In some cases, inductive meters are coated with copper on the measuring surfaces.

Experiments

As a complement to the literature study, the survey and the supplier interviews, several measurements were performed at RISE's National Metrology Centre for Volume and Flow in Borås in the spring of 2021. The aim was to answer some questions related to the questioning of current industry practice; Should the system be dimensioned based on flow or pressure drop? Is it possible to allow higher velocities and pressure drops without affecting the sound level? Is the dimensioning affected by the choice of material? Is there a difference in quality of different thermostatic bypass valves in relation to noise generation.

Six pipes of varying type and dimension were mounted on an acoustically damped concrete wall. The design of the concrete wall was based as far as possible on standards for structure-borne vibrations (European Committee for Standardization, 2009) and measurement of noise from installations for wastewater (Svenska Institutet för Standarder, 2019). Vibration velocity was chosen as the comparative key figure. With accelerometers attached to pipes and walls, the vibration velocity provided a relative measure of the ability of the pipes and components to conduct and generate vibrations. Vibrations were recorded at the two suspension points of the pipe and at the center of the tube with Brüel & Kjær 4507 accelerometers. Additional accelerometers (type PCB 393C) were mounted at two positions on the back of the concrete wall. The flow was increased with a frequency-controlled pump according to a preset program during which signals from flow meters, differential pressure gauges and accelerometers were sampled synchronized in a Siemens LMS Scadas XC data collection system. The RMS (Root Mean Square) for the acoustic signals was calculated with a frequency of 1 Hz.

Figure 3 shows the averaged vibration velocities from the three accelerometers attached to the tubes. The dashed lines represent the mean value from three runs on a pipe and the shaded area behind the line represents the corresponding spread.

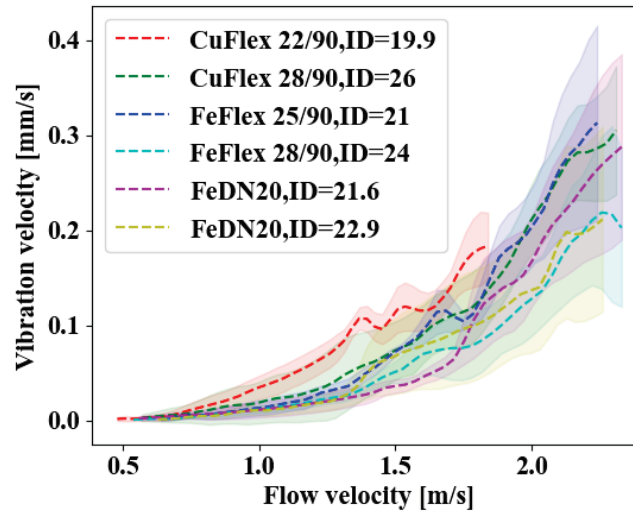


Figure 3. Larger increase in vibration velocities above a flow velocity of 1.5 m / s for examined pipes

A more detailed analysis of the results shows that the inner diameter/cross-sectional area is important. A narrow tube tends to reach higher vibration levels at a lower mass flow than a larger dimension tube. However, a coarser pipe becomes relatively more sensitive to high pressure drops since it then also means that you have a high mass flow. The vibration velocity is seen to be linked to the momentum. At the maximum flow velocities achieved in the lab, we see that the vibration levels begin to reach up to 0.4 mm/s in the pipes. 0.4 mm/s is described as the lower limit for the amplitude interval "moderate disturbance" in SS 4604861 (Svenska Institutet för Standarder, 1992).

Figure 4 shows the measured vibration levels from the three accelerometers that were attached to a tube. The curves represent the mean value from three runs per component tested.

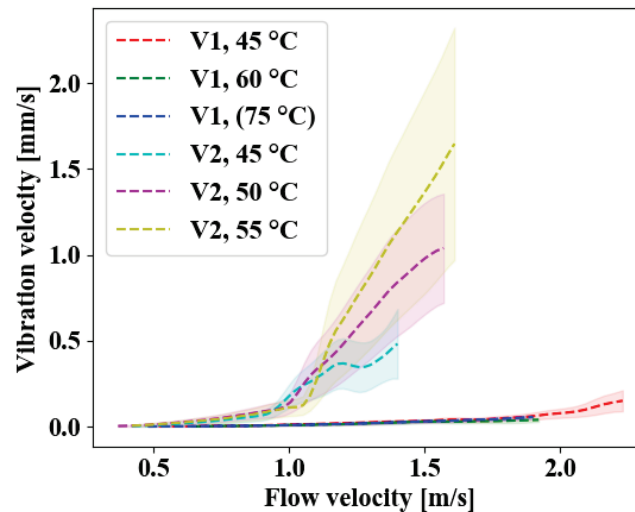


Figure 4. Large increase in vibration velocity for V2 above 1 m / s

The two components V1 and V2 are two thermostatic bypass valves that are common in Swedish district heating networks today, to avoid freezing, but they have different maximum permissible temperatures and differential pressures. They also differ in their geometries. V1 has a considerably better characteristic with respect to vibrations than what V2 shows. The vibration velocity from V2 is strongly dependent on the flow, while V1 almost seems unaffected by an increased flow rate within the tested interval. This indicates that the design of the valves differs in favor of V1. Interestingly, the breaking point at 1 m/s, where the vibrations reach a level of 0.4 mm/s which is characterized as "moderate disturbance" according to SS 4604861, coincide with the current best practice that we were instructed to question within this project.

Guide for dimensioning service lines

The conclusions from the work have resulted in a guide for dimensioning service lines regarding pressure drop and flow rate. The purpose is to provide the construction designer with guidance on how to choose the optimum pipe dimension in an arbitrary situation. The goal is to ensure good delivery to the customer, reduce costs, heat losses and the use of natural resources and to avoid the occurrence of noise and internal damage within the district heating systems.

Linked to the guide, the project group has also designed a digital tool for choosing a dimension in the design stage. It is available via GitHub at ([Link to digital tool](#)). The tool is implemented in HTML and JavaScript and is optimized for desktop use in a web browser. This means that the threshold for getting started is low. The source code is available under a CC BY-NC 4.0 license. It is therefore permitted to share and modify the original source code if it is done without commercial purposes and associated rules are followed.

Discussion

What is an optimal flow rate?

The goal is to have a flow rate that provides low investment costs and heat losses, but also secures delivery to the customer and reduces the risk of disturbing noise and wear on components.

To find this flow rate, the factors that can influence the choice of pipe dimensions need to be identified. Today's industry practice for pressure drops is 100 Pa / m. The risk is that it has led to an oversized infrastructure.

The two thermostatic bypass valves showed large differences in their results. This indicates that the design of the valves affects the sensitivity for vibrations. We recommend a maximum flow velocity of 1 m/s in cases where the network owner does not have access to these components. This velocity coincides with current practice. The difference we saw also highlights the fact that with good knowledge of your components it is possible to choose smaller dimensions thereby reduce investment costs and exceed 1 m/s in cases where it is appropriate.

Based on the results obtained during the measurements, we recommend a maximum flow velocity of 1.5 m/s in straight service pipes. The vibration levels for the pipes have been below what is described as moderate disturbance in SS 4604861 (Svenska Institutet för Standarder, 1992) Our recommendation is based on a precautionary principle and is based on the fact that vibration velocities increased faster above 1.5 m/s.

The experience we have had regarding sound indicates that the sound originates from components and not from the pipes. Vibrations from components in the system propagate via the pipes and propagate as structure-borne noise. In many cases, these can be removed if the construction is designed in a way that reduces the risk of sound propagating. This may, for example, apply to expansion-absorbing devices, penetrations in houses and absorbing suspensions on walls and ceilings. If noise has occurred, the source must be carefully analyzed to ensure that the vibrations do not result in future damages and accidents. If the pressure level of the return pipe falls below the limit for steam formation, noise may occur due to cavitation. Measures must be taken to avoid this, e.g. with pumps or pressure exchangers.

In addition to cavitation, we have placed great emphasis on corrosion in this report regarding internal damage. A general perception is that corrosion does not exist in district heating systems. But what do we really mean by that? Is it general corrosion we mean then? Are there certain types of corrosion that go under the radar? During the literature study, questions have arisen about the passive layers in the district heating pipes. Are they as stable and protective as the industry thinks? Do they consist of magnetite or are they of hematite? A high oxygen content and conductivity favors the corrosion process while the pH content is more complex in nature.

What we have noticed is that studies differ, especially in terms of recommended levels for pH. There can be many reasons for this. Different operating conditions during experiments, different purposes of the projects, different materials, great measurement uncertainty, subjectivity when assessing the degree of

corrosion. With these uncertainty factors included one can with a friendly mindset consider the results to be relatively consistent. As there is, after all, some uncertainty about pH, we can assume that the corrosion processes differ in different district heating networks based on the local conditions and operating conditions at each company.

Within our survey results regarding internal damage, it is possible to see a connection between particles and internal damage as 83% of the district heating networks with internal damage have a water that contains particles. However, it is not fully established to what degree particles cause internal damage, as 61.5% of district heating networks without internal damage also have water that contains particles.

Whether there is any link to increased risk of depositions at low velocities is not determined in this report. On the other hand, the literature study shows that the probability of specific deposition corrosion in district heating networks is relatively small. Based on our study, where different forms of corrosion have been reported, it appears, however, that common denominators for corrosion attacks are the availability of oxygen and potential differences. We imagine that a lower flow velocity could facilitate the formation of oxygen cells and change local potential differences, which can benefit several corrosion processes.

It is possible to conclude that there are many factors which are likely to be subjects for further relevant projects.

Conclusions

In the literature study, guideline values for optimal flow velocity were identified which were in accordance with current industry practice with recommended maximum velocities of 1 m/s for service pipes, 2.5 m/s for main pipes and 3.5 m/s for transmission pipes. It turned out that these were based on the cost level for the components (pipes, pumps and production facilities) and operation (fuel and pump energy). This is a factor that varies both between different systems and within the same system over time. In addition, the guideline is also 35 years old, thus it feels highly relevant to question this practice.

A pressure drop of 100 Pa/m for pipes in smaller dimensions occurs at low flow rates. The source of this industry practice is still unknown to us, but we can state with firm conviction that it is not related to noise in service pipes.

The risk of internal damage at low flow rates due to deposition corrosion is considered to be almost non-existent in district heating systems with good water quality. This is based on results from the literature study where experiences from water pipes of copper pipes that say that problems in water pipes of copper due to deposits are quite unusual.

The results from the measurements on the valve we called V2, which seem to have a significantly poorer sound performance than V1, coincide with current industry practice for a maximum flow velocity of 1 m/s for service pipes. Selection of components and design of expansion-absorbing devices, penetrations in houses and suspension of pipes affect the risk of disturbing noise. If the network owner

does not have control over component selection, the upper limit regarding the risk of noise should be set at 1 m/s.

Noise is related to vibrations and movements in the medium. The energy in the vibrations can be related to the mass flow. The vibration velocities increased at lower pressure drops for pipes with larger inner diameters.

The measurements indicated that the vibration velocity of the pipes and in the wall on which the pipes are suspended increases more sharply above a flow velocity of 1.5 m/s. The measurements were made up to a velocity of 2.8 m/s. We have set an upper limit regarding the risk of noise of 1.5 m/s in service pipes. This is done with the precautionary principle. It should be possible to stretch it further than that, but we do not want to do that, as we do not have coverage for it in the form of test results in this study. What we can say for sure is that at 1.5 m/s none of the pipes we have tested will be the major source of sound. In addition, the uncertainty increases when the flow velocities exceed 1.5 m/s and we also approach the limit for moderate interference according to SS 4604861 (Svenska Institutet för Standarder, 1992)

The literature study showed that there is an increased risk for internal damage due to erosion at flow velocities greater than 2 m/s in copper pipes and 3 m/s in steel pipes. The limit for the maximum flow rate in service pipes regarding internal damage due to erosion is governed by the water quality and whether particles remain during the construction of pipes as well as the design of the structure and flow-affecting details. If there is a desire to dimension according to these velocities, the factors that affect the harmful effects of erosion, such as pipe material and water quality, need to be comparable to those in district heating systems and verified by measurements.

A more dynamic way of dimensioning service pipes is recommended. The dimension of the service pipe should be determined by the velocity and the pressure drop, in relation to additional influencing factors mentioned in this report.

Bibliography

- Aghili, B. (05 1999). *Erosionskorrosion Rapport 99:29*. Hämtat från SKI:
<https://docplayer.se/14644620-Se9900318-ski-rapport-99-29-erosionkorrosion-behnaz-aghili-maj-1999-30-37-ski-issn-1104-1374-isrnski-r-99-29-se.html>
- Alström, J. (2019). *Slutna kyl- och värmesystem*. RISE via Kyltekniska The Swedish Society of Refrigeration.
- Brown, G. (den 31 08 2002). The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. *Proc. Environ. Water Resour. Hist.*, 38.
 doi:10.1061/40650(2003)4
- European Committee for Standardization. (2009). EN 15657-1. *European Standard*.
- Hellman, M. (2015). *Handbok i vattenkemi för energianläggningar Rapport 2015:113*. Hämtat från Energiforsk:
<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/18602/handbok-i-vattenkemi-foer-energianlaeggningar-energiforskrapport-2015-113.pdf>
- Kewen Peng, F. G. (2020). Interpreting the influence of liquid temperature on cavitation collapse intensity through bubble dynamic analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105253>
- Korrosionsgruppen. (2019). Katodiskt skydd - Korrosionlära.
- Li, Z., Zhang, J., & Cheng, J. (2017). The Influence of Critical Flow Velocity on Corrosion of Stainless Steel. *Journal of Failure Analysis and Prevention*.
 doi:10.1007/s11668-017-0369-1
- Maurin, G. (1986). *Värmekulverthandbok*. Svensk Byggtjänst.
- Storesund, J. (2015). *Handbok för livslängdsarbete med energianläggningar*.
- Svenska Institutet för Standarder. (den 09 09 1992). *Vibration och stöt - Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader*. Hämtat från
<https://www.sis.se/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/vibration-med-avseende-pa-manniskor/ss4604861/>
- Svenska Institutet för Standarder. (2019). SS-EN 14366:2004+A1:2019 Akustik – Mätning i laboratorium av buller från installationer för . SVENSK STANDARD.
- Uhlig, H. H., & Revie, R. W. (2008). *Corrosion and Corrosion Control, 4th edition*. John Wiley and Sons, Inc.
- Underhållsgruppen, Svensk Fjärrvärme. (2015). *Underhållshandboken för fjärrvärme*.
- Vinka, T.-G. (2003). *Genomfrätningar på kopparrör - orsaker, undersökningsmetoder och motåtgärder*. VA-Forsk.

Innehåll

1	Bakgrund	22
2	Syfte och mål	23
3	Avgränsningar	24
4	Litteraturstudie	25
4.1	Dimensionering	25
4.1.1	Förutsättningar	25
4.1.2	Flödes hastighet och tryckfall	25
4.2	Ljud	30
4.2.1	Buller	30
	4.2.1.1 <i>Krav avseende skydd mot buller</i>	30
	4.2.1.2 <i>Fortplantning av ljud</i>	30
4.2.2	Orsak till ljud	31
	4.2.2.1 <i>Roterande eller oscillerande delar</i>	31
	4.2.2.2 <i>Stomljud av höga flöden och tryckfall</i>	31
	4.2.2.3 <i>Olika tillstånd inom strömning</i>	31
	4.2.2.4 <i>Kavitation</i>	33
4.3	Invändiga skador	38
4.3.1	Korrosion	38
	4.3.1.1 <i>Grundläggande begrepp</i>	38
	4.3.1.2 <i>Korrosionsformer</i>	39
4.3.2	Vattenkvalitet	42
	4.3.2.1 <i>Föroreningar i vatten</i>	44
5	Erfarenheter från nätägare	47
5.1.1	Resultat i enkät angående ljud	47
5.1.2	Resultat i enkät angående invändiga skador och partiklar	47
6	Erfarenheter från leverantörer	49
6.1	Erfarenheter angående ljud	49
6.1.1	Ljud flödes hastighet/tryckfall	49
6.1.2	Ljud kopplat till anläggningsdelar	49
6.2	Erfarenheter angående inre skador	50
7	Mätningar	51
7.1	Frågeställningar	51
7.2	Utförande	51
7.3	Resultat	54
8	Guide för dimensionering av servisledningar	58
8.1	Faktorer som påverkar dimensionering av ledningar	58
8.2	orsaker till ljud, inre skador och andra problem	60
8.3	Val av dimension	60

9	Diskussion	62
10	Slutsatser	65
11	Framtida arbeten	67
12	Referenser	68

1 Bakgrund

En sedan länge vedertagen branschpraxis är att man håller sig under en flödes hastighet på 1 m/s och ett tryckfall på 100 Pa/m i servisledningar. Syftet är att undvika minskad komfort för kunder på grund av höga ljudnivåer och ökat slitage på komponenter.

Denna praxis börjar dock ifrågasättas och med ett mer dynamiskt förhållningssätt till systemdimensionering kan investeringarna i distributionsledningar minskas, värmeförlusterna sänkas, användningen av naturens resurser minskas och i en förlängning kan därmed även fjärrvärmens konkurrenskraft öka.

Energiforsk är ett forsknings- och kunskapsföretag som driver och samordnar energiforskning. Deras uppdragsgivare finns bland industrin och energiföretagen, i myndigheter och EU samt bland branschorganisationer, konsulter och ideella organisationer. Energiforsk driver forskningsprogrammet FutureHeat, som en del av detta, med den långsiktiga visionen om ett hållbart uppvärmningssystem. Detta projekt är initierat och bekostas inom Futureheat.

Sökord

Flödes hastighet, tryckfall, vibrationshastighet, dimensionering, servisledningar, ljud, inre skador, erosion, korrosion

2 Syfte och mål

Målet med projektet är att utreda var de praktiska gränserna går avseende maximala och minimala flödeshastigheter i serviser i dagens distributionssystem för fjärrvärme utan komfortminskning för kunden (relaterat till oljud) eller inre skador i fjärrvärmerören.

I projektet har problematiken kartlagts, sambandet mellan flödeshastighet och ljudnivåer för servisledningar beskrivits samt en lathund för dimensionering av serviser utformats.

Projektets syfte är att granska och ifrågasätta branschpraxis för rördimensionering för att kunna optimera dimensioneringen av servisledningar.

3 Avgränsningar

Risker för inre skador pga partiklar som orsakar erosion vid höga flödeshastigheter respektive slambildning vid låga har sammanställts från genomgångna rapporter. Denna teoretiska avgränsning gjordes då projekttiden var för kort för att utföra accelererade mätningar med ett tillförlitligt resultat.

Planerade fältstudier har inte kunnat utföras pga att uppkomna ljudproblem inte blir långvariga då de behöver lösas omgående för att begränsa olägenheter och minimera den bristande kvalitén på kundens leverans. Därav har ingen nätägare haft någon aktuell punkt med ljudproblem att utföra fältmätningar på.

Mätningarna i laboratoriet har gjorts vid en vätsketemperatur av 40° C pga arbetsmiljöskäl.

4 Litteraturstudie

För att möjliggöra utredningen av var de praktiska gränserna går avseende maximala och minimala flödes hastigheter i serviser, har en litteraturstudie genomförts där gällande branschpraxis samt fakta om dimensionering, ljud och inre skador har kartlagts.

4.1 DIMENSIONERING

I detta avsnitt redovisas en kartläggning av den vedertagna branschpraxis som finns för dimensionering av fjärrvärmeledningar och problematiken med den.

4.1.1 Föresättningar

Det är förbrukningsmönstret i alla anslutna kundcentraler som bestämmer aktuellt flöde, returtemperatur och effekt i fjärrvärmenätet. Detta innebär att funktionen och temperaturprogrammen i enskilda anslutna fastigheters interna system eller sekundära distributionsnät har stor påverkan på övriga systemet.

Distributionspumparnas uppgift är att säkerställa leveransen till alla leveranspunkter och styrs normalt mot den punkt i nätet som har lägst differenstryck. Detta påverkar och kan ge problem med höga differenstryck i andra delar av nätet. Även höjdskillnader och produktionsanläggningar i olika delar av nätet påverkar trycknivåerna i nätet.

Enligt D:211 Läggningsanvisningar för fjärrvärme- och fjärrkyleanläggningar (Energiföretagen, 2019) är ett distributionsnät korrekt dimensionerat när differenstrycket, i alla leveranspunkter, är inom intervallet 1 till 6 Bar. I F:101 Fjärrvärmecentralen - Utförande och installation (Energiföretagen, 2014) anges att differenstrycket över en fjärrvärmecentral inte får vara lägre än 1 bar och inte bör överstiga 6 bar, men att det redan vid differenstrycket 4 bar kan uppstå ljudproblem som måste åtgärdas.

Vid val av ledningsdimension är det många faktorer som styr/påverkar, bla:

- framledningstemperatur
- kundcentralernas behov, från dimensionerande utetemperatur (DUT) på vintern till sommarförhållanden
- kundcentralernas avkylning
- ledningens isolering (värmeförluster)
- ledningens längd
- tillgängligt differenstryck vid anslutningspunkten
- framtida expansionsplaner

4.1.2 Flödes hastighet och tryckfall

Bakgrunden till gällande branschpraxis för flödes hastighet kan komma från Värmekulverthandbok (Maurin, 1986). Där anges riktvärden för optimal flödes hastighet vid dimensionering, se Tabell 1. Denna optimala flödes hastighet

baserar sig på kostnadsnivån för anläggningens delar (rör, pumpar och produktionsanläggningar) och drift (bränsle och pumpenergi).

Tabell 1. Riktvärden för optimal flödeshastighet vid dimensionering enligt Värmekulverthandbok (Maurin, 1986).

DN	DN20	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100	DN125
m/s	0,90	0,90	1,00	1,20	1,40	1,50	1,80	2,00
DN	DN150	DN200	DN300	DN400	DN500	DN600	DN700	DN≥800
m/s	2,20	2,50	2,60	2,70	2,90	3,00	3,20	3,50

Materialleverantörerna (Logstor, 2019) (Powerpipe, 2021) anger rekommendationer i samma storleksordning i sina kataloger, men då som maximala flödeshastigheter:

- servisledning - 1 m/s (villaservis koppar - 2 m/s)
- stamledning - 2,5 m/s
- överföringsledning - 3,5 m/s

För minsta flödeshastighet påtalar de att hänsyn ska tas till lägsta tillåtna framledningstemperatur och differenstryck i ledningar som finns längst ut i nätet.

Kostnadsnivåerna som Värmekulverthandboken baserar den optimala flödeshastigheten i tabellen ovan på varierar både mellan olika system och inom samma system över tid. Detta medför att det är svårt att ange en fast optimal flödeshastighet eftersom även den borde variera. Dessutom är kostnadsnivåerna 35 år gamla.

En högre flödeshastighet i ledningar ger:

- möjlighet till mindre dimension, vilket ger lägre material-/investerings-/anläggningskostnad
- lägre värmeförluster då klenare ledningar väljs som ger mindre värmeavgivande yta, vilket minskar bränsleförbrukningen
- större tryckfall/friktionsförlust, vilket ger ökat pumparbete och därmed högre driftskostnad
- kortare uppehållstid, vilket ger snabbare respons vid förändringar i medie-/framledningstemperatur
- kraftigare tryckstöt/-slag vid eventuella pumpstopp eller hastig manövrering av ventiler
- högre risk för kavitation
- större risk för erosionsskador
- risk för högre ljudnivåer

Genom att räkna om dessa flödeshastigheter till tryckfall kan vi jämföra dem med dagens branschpraxis för tryckfall på 100 Pa/m. Bakgrunden till denna branschpraxis för tryckfall har inte hittats.

Tryckfallet i en rörledning, Δp , pga friktionen kan beräknas med Darcy-Weisbachs ekvation (Brown, 2002), som även återfinns i Värmekulverthandboken. (Maurin, 1986):

$$\Delta p = \frac{\lambda L \rho v^2}{2d} \quad (1)$$

λ = Friktionstal som beror av Reynoldstal (se avsnitt 4.2.2.3 *Olika tillstånd inom strömning*) och rörmaterialets ytråhet

L = Ledningens längd (m)

d = Medierörets innerdiameter (m)

ρ = Mediets densitet (kg/m^3)

v = Mediets flödes hastighet (m/s)

Av Ekvation (1) framgår att tryckfallet ökar med flödes hastigheten i kvadrat, ökar direkt mot längden och vattnets densitet samt minskar då diametern ökar. Man ser också att tryckfallet är beroende av friktionstalet vilket kommer att belysas senare. I formeln har motstånd i eventuella rördelar och komponenter exkluderats.

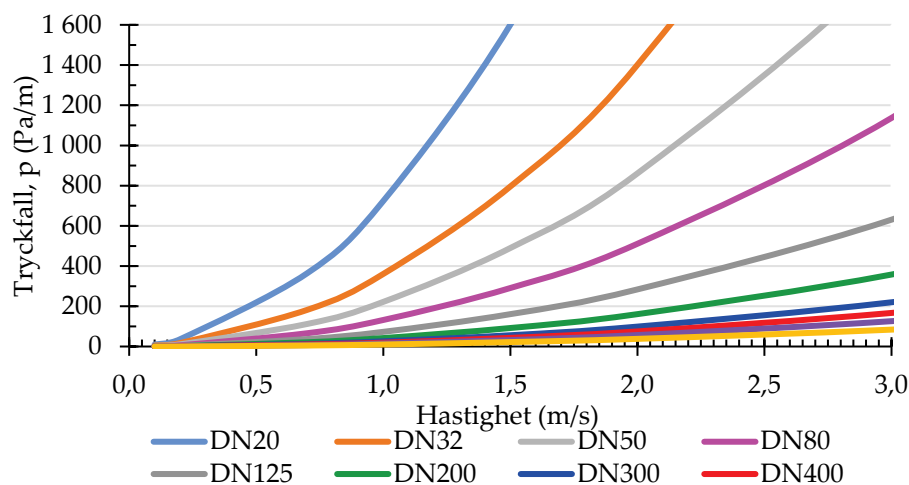
Av Tabell 2 framgår att den optimala flödes hastigheten i Tabell 1 ger tryckfall som är betydligt högre än denna branschpraxis vid små dimensioner. Det är först vid $\text{DN} \geq 600$ som tryckfallet är i nivå med den.

Tabell 2. Teoretiska värden för tryckfall vid en medietemperatur på 60°C.

DN	DN20	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100	DN125
Pa/m	592	295	300	317	311	291	300	284
DN	DN150	DN200	DN300	DN400	DN500	DN600	DN700	DN≥800
Pa/m	271	250	166	135	118	101	96	97

Hur tryckfallet påverkas av de olika faktorerna i Ekvation (1) tydliggörs diagram i Figur 1-Figur 3.

Figur 1 visar tryckfallet i stålrör med 60 °C vatten vid olika dimensioner och flödes hastigheter. Det framgår tydligt varför rekommenderad flödes hastighet är lägre för mindre ledningar.

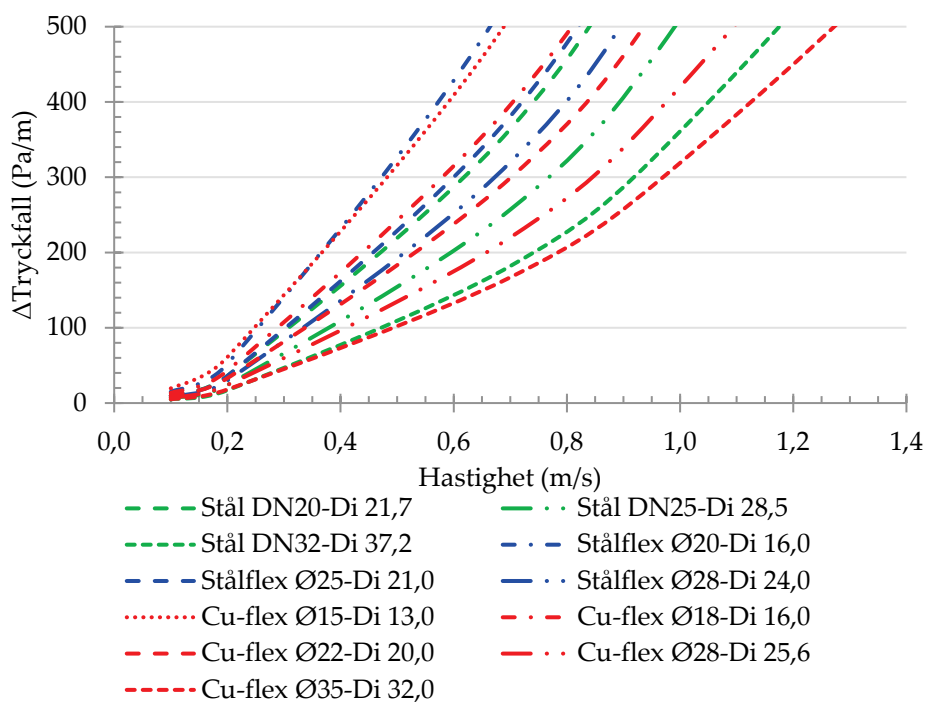


Figur 1. Tryckfall i stålror vid medietemperatur 60° C för olika dimensioner och flödeshastigheter.

Rörmaterialets ytråhet

Figur 2 nedan visar hur ytråheten i olika medierör påverkar tryckfallet för rör med 60 °C vatten vid olika dimension, medierörsmaterial och flödeshastighet.

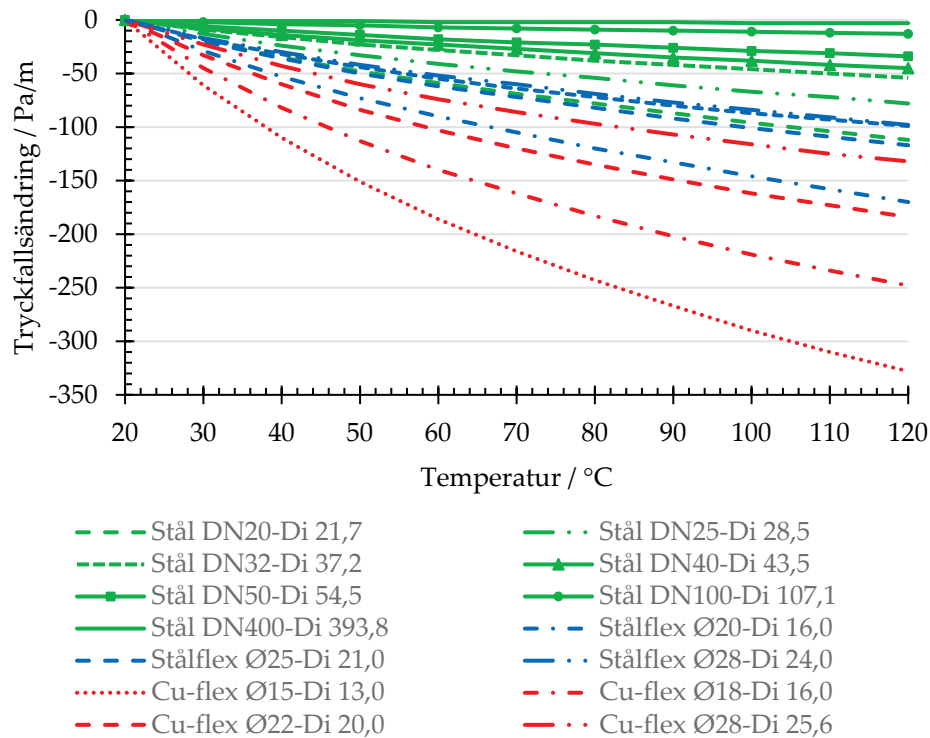
Det framgår att ytråheten i kopparflex är lägst vilket ger mindre tryckförluster. Det får dock poängteras att ytråheten påverkas av tex beläggningar som uppstår i fjärrvärmesystemet vilket gör att den varierar från rör till rör och att osäkerheten för ytråheten i ett godtyckligt rör får anses vara relativt stor.



Figur 2. Tryckfall vid medietemperatur 60° C för olika material, dimensioner och flödeshastigheter

Mediets temperatur

Figur 3 nedan visar hur mediets temperatur påverkar tryckfallet i rör med en flödeshastighet på 1 m/s samt olika medierörsmaterial och dimension. Det framgår att en högre temperatur ger ett lägre tryckfall eftersom mediets densitet sjunker med stigande temperatur. Det framgår även att tryckfallsminskningen vid stigande temperatur är större vid små dimensioner och försumbar vid stora.



Figur 3. Tryckfall vid flödeshastighet 1 m/s för olika material, dimensioner och medietemperaturer.

Studerar man Figur 3 lite närmare syns dock en skillnad mellan kopparflex och stålflex med en innerdiameter av 16 mm. I absoluta tal är tryckfallet i en kopparflexledning lägre än i en stålflexledning på grund av kopparflexens slätare yta (lägre råhetstal). Förändringen av tryckfallet på grund av temperatur är dock kraftigare hos kopparflexen, vilket kan förklaras av sambandet mellan tryckfall i ett rör och dess friktionstal, se Ekvation (1).

Friktionstalet, λ , är beroende av den relativa ytråheten, dvs ytstrukturen på insidan röret och rörets innerdiameter. Dessa parametrar ändras inte med temperaturen. Däremot är λ också beroende av vätskans viskositet. Eftersom viskositeten ändras med temperaturen ändras också friktionstalet. När temperaturen stiger så sjunker viskositeten och det bidrar till sänkt friktion. Friktionstalets ändring är kraftigare för slätare rör vilket förklarar den större tryckfallsminskningen vi ser för kopparflex jämfört med stålflex.

4.2 LJUD

4.2.1 Buller

Oönskat och störande ljud kallas för buller. Höga ljudnivåer är skadligt för hörseln. Ljud som inte stör en person med normal hörsel kan vara mycket störande för den som är hörselskadad. Buller påverkar oss psykologiskt men även fysiskt. Mer om buller finns att läsa hos Arbetsmiljöverket (Arbetsmiljöverket, 2020), som också skriver att:

Olika bullerkällor avger olika typer av buller:

- **konstant kontinuerligt buller** - frekvens- och styrkesammansättningen varierar inte med tiden, tex elmotorer
- **fluktuerande buller** - frekvens- och styrkesammansättningen förändras hela tiden tex till följd av att källans driftsförhållanden ändras
- **impulsartat buller** - mycket kortvariga ljud, mindre än 1 sekunder och vars peakvärde (toppvärde) överstiger ljudnivån med mer än 15 dB, tex skott, slag, maskinslammer

4.2.1.1 Krav avseende skydd mot buller

För att uppfylla det krav på skydd mot buller som anges i Plan- och bygglagen (Sveriges Riksdag, 2010) ska ett byggnadsverk vara projekterat och utfört på ett sådant sätt att buller, som uppfattas av användarna eller andra personer i närheten av byggnadsverket, ligger på en nivå som inte medför en oacceptabel risk för dessa personers hälsa och som möjliggör sömn, vila och arbete under tillfredsställande förhållanden *Plan- och byggförordningen 3 kap, 13 §* (Regeringen, 2011). Om bullrande verksamhet gränsar till bostäder, ska särskilt ljudisolerande åtgärder vidtas (Boverket, 2013).

4.2.1.2 Fortplantning av ljud

Ljud kan fortplanta sig i alla medier. Ljud består av vågor, eller tryckvariationer som uppstår i mediet. För att ljudet ska kunna fortplanta sig krävs alltså ett medium. I avsaknad av medium (vakuum) finns inte längre någon energibärare som där ljudet kan fortplantas och ljudet dör ut. Ljud benämns utifrån det medie som det sprider sig via.

- Luftljud är ljud som utbreder sig i luft. Det är de ljud som hörs inom ett utrymme med installationer (även ovanför ett lätt undertak, bredvid schakt mm)
- Vätskeburet ljud eller vätskeljud är ljud som utbreder sig i vätska.
- Stomljud är ljud som utbreder sig i fasta material. Det är de ljud som sprids med vibrationer i byggnadsstommen och hörs i andra utrymmen

(Johansson B. , 2002)

4.2.2 Orsak till ljud

Ljud uppkommer från vibrationer i installationer, tex pga;

- roterande eller vibrerande delar, tex pumpar eller ventiler
- vätskeströmning/-flöde i rör

4.2.2.1 Roterande eller oscillerande delar

Oavsett hur väl balanserad en konstruktion är så uppstår ofta obalanskrafter vid drift i roterande eller oscillerande delar. Dessa obalanskrafter leder till vibrationer.

För att uppnå minimala stomljud behöver vibrationsisoleringen dimensioneras med hänsyn till hela frekvensområdet och det underlag som utrustningen står på eller är fäst i. (Simmons, SBUF 11941 - Stomburet installationsljud, handbok C, 2009)

4.2.2.2 Stomljud av höga flöden och tryckfall

I rör skapas vibrationer vid höga vattenhastigheter och stora tryckfall pga turbulens, lokala riktningsförändringar eller kavitation, exempelvis över radiatorventiler. Vibrationerna kan fortläpa sig till radiatorerna och via infästningar till väggar, golv och tak, som i sin tur fungerar som "högtalare" när de vibrerar (luftljud).

Till viss del kan ljud direkt från rören dämpas av isolering, men det handlar i första hand om att dämpa svängningarna i röret, för att undvika att ljudvågorna överförs till den kringliggande luften. Stomljud kan ofta vara ett större problem. Stomljudens magnitud är starkt beroende av infästningens konstruktion. Vibrationsdämpande infästningar fungerar bra i tyngre väggar och bjälklag, medan det kan vara svårt undvika stomljud i lättare konstruktioner.

Om vibrerande installationer dras i uppreglade väggar och bjälklag bör de fästas in i separata reglar som inte har kontakt med skivor eller reglar mot rum. (Simmons, SBUF 12279 Rörssystem stomljud, 2011)

4.2.2.3 Olika tillstånd inom strömning

Vid laminär strömning rör sig strömningsspartiklarna parallellt i längdriktning axiellt med röret. Vid den typen av strömning kan vätskan "skiktas", vilket exempelvis kan ge upphov till temperaturskillnader över rörets tvärsnitt. Laminär strömning kan bara förekomma om hastigheten på fluiden är tillräckligt låg. Utöver hastigheten påverkas strömningstypen även av rörets diameter, fluidens hastighet, viskositet och densitet.

Vid turbulent strömning uppträder även rörelser tvärs rörets längdriktning som resulterar i en fullständig mixning av fluiden. Det ger upphov till varierande sidokrafter och hastighetsförändringar som kan uppfattas som vibrationer/ljud.

För att beräkna om strömningen är laminär eller turbulent, använder man sig av den dimensionslösa kvoten

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \text{ eller } Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

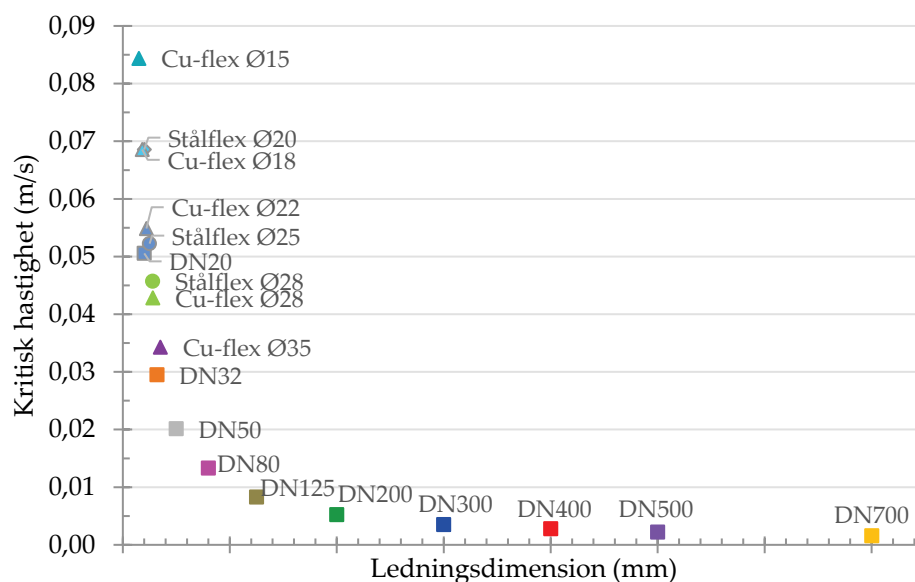
där Re är Reynolds tal, v är den linjära medelhastigheten, D är rördiametern, ρ , är densiteten, μ är den dynamiska viskositeten och ν är den kinematiska viskositeten.

I praktiken kan man dela in rörströmning i tre olika områden:

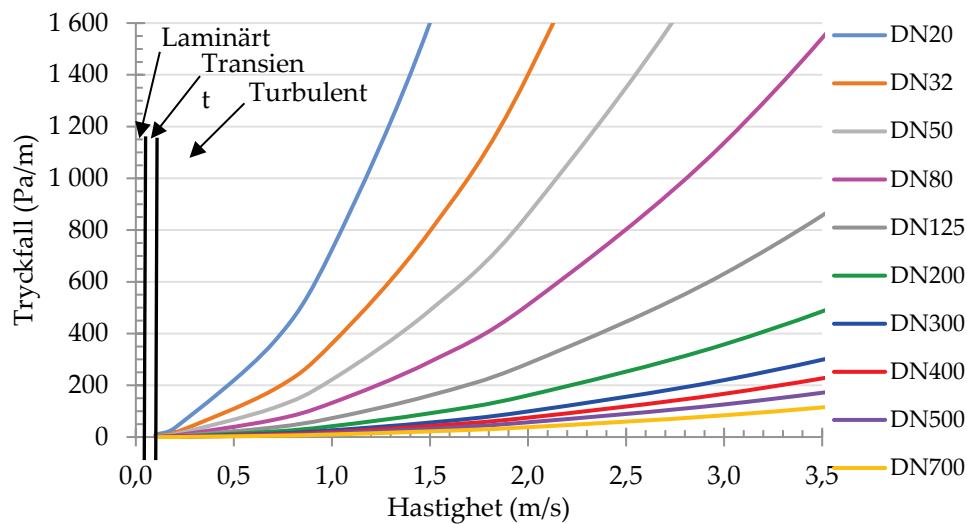
Tabell 3. Gränsvärden för strömningsområden

Laminärt område	$Re < 2000$
Övergångs- eller kritiskt område (Transient)	$2000 < Re < 4000-5000$
Turbulent område	$Re > 4000-5000$

Det transienta området är ganska instabilt. Små ojämnheter i röret kan exempelvis trigga övergående turbulens. Även om omslaget sker vid samma Reynoldstal är den kritiska strömningshastighet vid vilken detta sker olika för olika dimensioner, se Figur 4.



Figur 4. Kritisk strömningshastighet för olika dimensioner



Figur 5. Gräns för laminär strömning

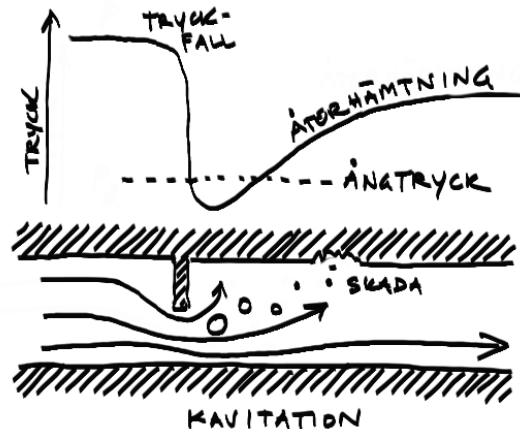
Utifrån att den kritiska strömningshastigheten är så låg för förekommande dimensioner kan vi utgå ifrån att det nästan alltid är turbulent strömning i fjärrvärmesystem, se Figur 5.

Turbulens är positivt ur ett värmeöverföringsperspektiv, då den förbättrar värmeöverföringen. En ökad överföring av värme är en god egenskap i tex värmeväxlare. Nackdelen är att ett turbulent flöde har ett större tryckfall än ett laminärt.

4.2.2.4 Kavitation

Bubblor är inte alltid mjuka och studsiga. De kan också vara destruktiva och farliga (Tiborn, 2019).

Kavitation är ett fysikaliskt fenomen som uppstår när trycknivån i en strömmande vätska lokalt understiger dess förångningstryck. Delar av vätskan kommer då att förångas och ångblåsor att bildas (Johansson & Wollerstrand, 2009), se Figur 6.



Figur 6. Kavitation i anslutning till reduktion av flödets tvärsnittsarea (vanligt i pumpar eller ventiler) och åtgärder för att minska risken för kavitation.

När dessa ångblåsor följer med vätskeströmmen till områden med högre tryck än ångtrycket kan mediet ej längre existera i ångform och ångblåsorna störtar samman, "imploderar". Vid varje implosion uppstår en kraftig tryckpuls. Vid kavitation uppstår ljud när kavitationsbubblorna imploderar. (Pumpportalen, 2021).

Kavitation kan uppstå då trycket sjunker samtidigt som flödes hastigheten höjs. Detta kan exempelvis uppstå pga en plötslig minskning av flödets tvärsnittsarea. Buller pga kavitation i tex pumpar eller ventiler kan vara ett skramlande eller skarpt väsande ljud liknande "grus i ledningar och komponenter". Vid svår kavitation kan ljudet fortplanta sig i installationen (ASHRE, 2009).

Vid kavitation, exempelvis i en ventil med en smal spalt, kan ljudnivåer i storleksordningen 120 dB förekomma. (Fichter, 2008) Att vi inte hör dessa enorma nivåer beror på att vätska och rörmaterial har betydligt högre akustisk impedans än den omgivande luften där våra öron befinner sig. I gränsskiktet mellan två medier med stor skillnad i impedans uppstår reflektion av ljudvågor. Det mesta av ljudet leds således bort via röret och det inneslutna vattnet.

Risken för kavitation är som störst där trycket är som lägst. För att undvika kavitation i pumpar, använder man sig av begreppet "lägsta pumpinloppstryck" (NPSH). NPSH kommer från engelskan och betyder Net Positive Suction Head. Man skiljer på NPSHa (-available) och NPSHr (-required) (Xylem, 2015). NPSHa har inget med pumpen att göra utan är ett värde som beskriver systemet där pumpen ska kopplas in. Värdet redovisar skillnaden mellan totaltrycket på pumpens sug sida och vätskans ångbildningsstryck mätt i meter vätskepelare och definieras som

$$NPSHa = \text{Pumpens inloppstryck} - \text{Ångtrycket (m)} \quad (3)$$

NPSHr är å andra sidan en pumpspecifik parameter som återfinns i pumpens datablad. Förhållandet mellan de två variablerna villkoras som

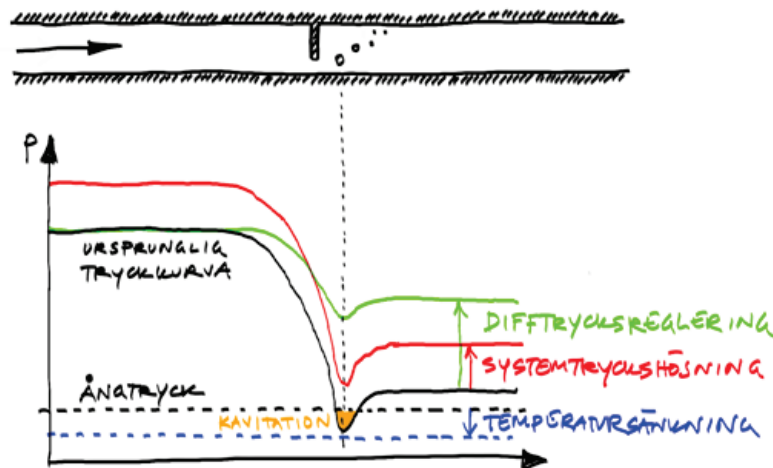
$$NPSHa \geq NPSHr + \text{marginal} \quad (4)$$

Vanligtvis säkerställer man att villkoret är uppfyllt vid en marginal i storleksordningen 1,5 m vätskepelare.

Värdet används som en säkerhetsnivå för sugtrycket, för att undvika kavitation.

När det finns risk för kavitation i en pump finns det flera praktiska metoder för att undvika detta, man kan öka inloppstrycket, minska friktionsförlusterna i sugledningen, minska pumpens flöde och om inget annat hjälper, välja en annan pump med ett lägre NPSHr.

I en styrventil i en fjärrvärmecentral sker ett tryckfall från trycket i framledningen (minus tryckfallet i armaturen) till trycknivån i returledningen. Lokalt i ventilens strypanordning kan då trycknivån sjunka under mediets förångningstryck, markerat med gult i Figur 7.



Figur 7. Principskiss av tryckfallet över en förträngning (exempelvis en styrventil)

Förångningstrycket stiger med temperaturen, varför det för att undvika kavitation är fördelaktigt att styrventilen placeras där temperaturen är som lägst (i returledningen).

Strategier för att minska kavitationsbenägenheten

Ur ett systemperspektiv finns det tre parametrar som kan minska kavitationen hos styrventiler i fjärrvärmesystem, se Figur 7:

- Att sänka temperaturnivån / förbättra avkylningen (blå kurva)
- Att öka det statiska trycket via tryckhållning (röd kurva)
- Att installera differenstrycksregulatorer eller strypventiler för att minska nödvändigt tryckfall över styrventilen (grön kurva)

Skadeverkningar

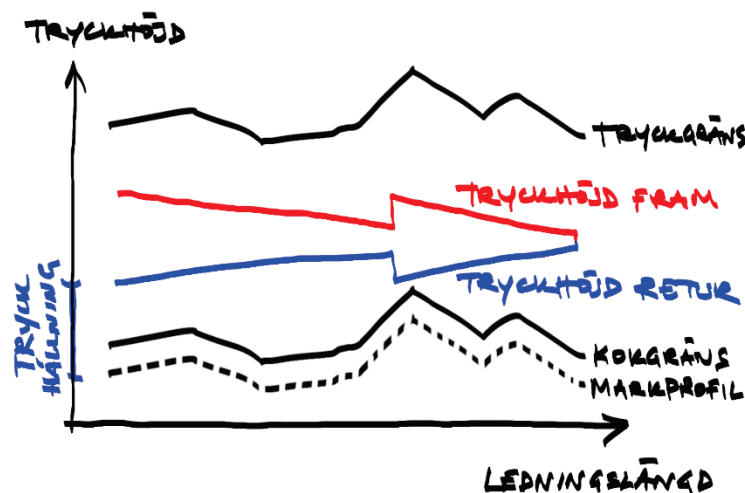
När kavitationsbubblorna imploderar kan det bildas en mycket tunn jetstråle från bubblan som med stor kraft kan skada närliggande ytor. Effekten leder på sikt till att ytan eroderar. Erosionsgraden påverkas av kavitationsintensiteten samt

avstånd till närliggande väggar. Hårda och spröda material har generellt sett betydligt sämre motstånd mot kavitation än sega material (Wikipedia, 2020). Kavitation kan minska komponenternas prestanda och, beroende på intensiteten, även väsentligt minska deras livslängd på grund av erosion (Johansson & Wollerstrand, 2009) (Grundfos, 2021).

Mekaniska skador orsakade av kavitation beror på hur pass nära väggar och inre delar av ventilen implosionerna sker och hur pass intensiv själva kavitationen är. Temperaturen påverkar kavitationens intensitet. Laboratorieförsök och simuleringar visar att kavitationens intensitet är som högst vid en vätsketemperatur strax över 30 °C. Detta förklaras av balansen mellan yttre tryck, inre tryck och andelen ånga i kavitationsbubblan. (Kewen Peng, 2020)

Tryckhöjd

För att undvika kokning med efterföljande kavitation i slutna fjärrvärmesystem bör tryckhållning av systemet bestämmas utifrån ett tryckhöjdsdiagram, Figur 8. Då det statiska trycket i ett fjärrvärmesystem varierar med ledningens höjd kommer också kokgränsen att variera. I atmosfärstryck vid marknivå (100 kPa) kokar vatten vid 100 °C. I ett system med 120 °C vatten kan kokgränsen, mätt i meter vattenpelare, uppskattas till en höjd av ca 10 m ovan marknivå, då det kokar vid ett absoluttryck av 200 kPa. Det är vanligt att fjärrvärmesystem dimensioneras för ett tryck på 16 bar. I ett sådant system erhålls den övre tryckgränsen genom att addera 160 m till markprofilen. (Frederiksen & Werner, 2014).



Figur 8. Tryckhöjdsdiagram

Tryckhöjden H , i fram och returledningen kan återges i samma diagram som markprofil och tryckgränser vilket underlättar analysen. H , definieras som

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} + z - \frac{8 \cdot \lambda \cdot L \cdot \dot{m}^2}{d^5 \pi^2 \rho} \quad (5)$$

där ρ är vattnets densitet och g är tyngdaccelerationen, λ är friktionsfaktorn, L är rörlängd, $\dot{m}$ är massflödet och d är innerdiametern. Den första termen på höger sida representerar skillnaden mellan tryckhöjdskurvan H och markprofilen z på grund av övertrycket p . Den sista termen representerar tryckfallet längs en sträcka L på grund av massflödet. Enligt Pascals lag minskar trycket i en vätska med ökande höjd z enligt

$$p = p_0 - \rho \cdot g \cdot z \quad (6)$$

Pascals lag kan deriveras avseende på höjden

$$\frac{dp}{dz} = -\rho \cdot g \quad (7)$$

Gör vi motsvarande för Ekvation (5) fås

$$\frac{dH}{dz} = -1 + 1 - 0 = 0 \quad (8)$$

Det betyder att den vänstra termen i uttrycket för H minskar lika mycket som z ökar, samt att termen som representerar tryckfallet på grund av flödet inte ändras med höjden. Man kan därför säga att inverkan av markprofilen elimineras i tryckhöjdskurvorna och det blir endast friktionskrafterna i ledningen, representerade av den sista termen som åskådliggörs som ett tryckfall längs med ledningsnätets utbredning. Tryckfallsgradienten representeras då av

$$\frac{dH}{dL} = 0 + 0 - \frac{8 \cdot \lambda \cdot \dot{m}^2}{d^5 \pi^2 \rho} \quad (9)$$

Villkoret för kokning är att tryckhöjdskurvan H understiger kokgränsen, dvs när övertrycket, p , understiger ångtrycket.

$$H < Kokgräns \quad (10)$$

4.3 INVÄNDIGA SKADOR

En av frågeställningarna i uppdraget är om och i sådant fall vad det finns för risker för att invändiga skador uppstår om flödes hastigheten är hög respektive låg. De faktorer som, enskilt eller tillsammans, kan orsaka inre skador i fjärrvärmerör är korrosion och partiklar.

4.3.1 Korrosion

4.3.1.1 Grundläggande begrepp

Korrosion är en kemisk reaktion mellan ett material och den omgivande miljön. Ett material, vanligtvis en metall, löses upp till en mer stabil form som exempelvis oxider, hydroxider och sulfider. Orsaken till att korrosion över huvud taget förekommer i metaller är på grund av deras tillverkningsprocess. Den kraftiga tillförseln av energi under tillverkningen gör att det rena metalliska tillståndet inte är lika stabilt. Metallerna strävar efter att omvandla sig till de former de vanligtvis förekommer i naturligt. (Storesund, 2015) (Korrosionsgruppen, 2019)

Det finns ett stort antal typer av korrosion, vissa mer vanligt förekommande i fjärrvärmenät än andra, men grundförutsättning för att korrosion ska uppstå är att det förekommer en potentialskillnad. Man pratar om elektrokemiska celler. Beroende på typ av korrosion kan dessa elektrokemiska celler se olika ut, men den gemensamma nämnaren är att de består av en positiv pol, en negativ pol och en elektrolyt som sluter cellen och möjliggör jontransport. Polerna kan bestå av två olika metaller men de kan också utgöras av en enskild metall med en heterogen laddningsdistribution över ytan. I ett fjärrvärmesystem utgörs elektrolyten av vatten. Vid elektrokemisk korrosion som är vad detta handlar om avges (oxidation) och upptas (reduktion) elektroner från dessa elektriskt laddade poler. En korrosionsström söker sig från högre potential via vattnet till metallytor med lägre potential. Det som accelererar korrosionsprocessen är närvaron av syre och hög ledningsförmåga (salthalt). Beroende på syremängd och ledningsförmåga bildas olika korrosionsprodukter (oxider, hydroxider och sulfider) på metallens yta, sk passivskikt. Dessa kan i vissa fall på sikt få korrosionsprocessen att avstanna. I fjärrvärmesystem är de vanligaste passivskikten de som bildas på kolstål av rödrost (Fe_2O_3), även kallat hematit, eller svartrost (Fe_3O_4), även kallad magnetit. Den magnetit som förekommer i fjärrvärmenät har sannolikt bildats av järnhydroxid $\text{Fe}(\text{OH})_2$ vid temperaturer över 100 °C. Sedan påverkar även surhetsgraden (pH) vilket förtjänar ett eget avsnitt i denna rapport på grund av dess komplexitet. (Carlsson, 2011) (Hellman, 2015) (Korrosionsgruppen, 2019) (Storesund, 2015) (Aghili, 1999)

4.3.1.2 Korrosionsformer

Allmän korrosion

Metaller som exempelvis stål tillverkas av järn med inblandning av kol. Detta medför att heterogena ytskikt bildas. Mer kolrika delar av ytan antar en negativ laddning medan de järnrika delarna blir positivt laddade. Det ger en jämn korrosion över hela ytan. (Carlsson, 2011) (Bertilsson & Mowitz, 2002) (Svenska värmeverksföreningen, 1985)

Galvanisk korrosion

När två metaller med en skillnad i ädelhet (olika elektropotential) är tillräckligt nära varandra för att bilda en elektrokemisk cell så uppstår vid gynnsamma förutsättningar galvanisk korrosion eller bimetallkorrosion. Den oädlare metallen med lägre potential angrips medan den ädlare skyddas. Det krävs en skillnad i korrosionspotential på minst 50 mV. Detta kan exempelvis förekomma där koppar och stål förekommer i närhet till varandra. (Bertilsson & Mowitz, 2002) (Hellman, 2015)

För att minska riskerna för galvanisk korrosion kan man:

- Förhindra galvanisk kontakt mellan materialen, genom att lägga in ett elektriskt isolerande material mellan dem.
- Hindra fukt och vatten att komma i direkt beröring med materialen
- Reducera mängden syre

Punktfrätning

Passiverbara metaller, dvs den typen av metaller vars korrosion ger upphov till ett skyddande passivt skick på ytan, kan i vissa fall drabbas av punktfrätning (gropfrätning/syrekorrosion/eng. pitting). Förloppet initieras med en fysisk skada i passivskiktet. I motsats till exemplet för allmänskorrosion där potentialvariationen var slumpmässigt distribuerad över ytan kommer här hela det oskadade passivskiktet anta en högre potential än den blottlagda metallen. Det medför en hög korrosionshastighet i den blottlagda punkten på grund av en hög strömtäthet (korrosionsström). Efter en tid bildas avlagringar och de elektrokemiska förutsättningarna i gropan ändras. Syre förbrukas, pH-sjunker och det bildas en potentialskillnad i förhållande till omgivningen som bidrar till ett fortsatt korrosionsangrepp. (Carlsson, 2011) (Bertilsson & Mowitz, 2002) (Svenska värmeverksföreningen, 1985) (Hellman, 2015) (Storesund, 2015) (Nordvärme, Fjernvarmegruppen, 1990)

Spaltkorrosion

Spaltkorrosion (filiform korrosion) har stora likheter med punktkorrosion. Drivkraften för spaltkorrosion är att det bildas en lokal syrecell, med en låg syrehalt och högt pH i förhållande till omgivande vätska. Detta kan exempelvis uppstå i trånga spalter. Det är alltså inte fråga om galvanisk korrosion i det här fallet. Den lägre potentialen uppstår då inne i spalten där materialet angrips medan den högre potentialen uppstår utanför syrecellen. Att upptäcka den här typen av korrosion tidigt är svårt då tillväxten ofta sker en bit in i spalten. Man kan dock se korrosionsprodukter läcka ut från spalten. (Storesund, 2015) (Nordvärme, Fjernvarmegruppen, 1990)

Avlagringskorrosion

Precis som vid punkt- och spaltkorrosion kan en cell med låg syrehalt, hög koncentration av kloridjoner och ett lågt pH bildas under avlagringar på tex rörväggar. Det ger upphov till en potentialskillnad på samma sätt som vid de tidigare nämnda korrosionstyperna och korrosionsströmmen är ett faktum. Man noterar att processen går långsammare i vatten med låg konduktivitet (låg koncentration av kloridjoner) och låg syrehalt. (Hellman, 2015)

Erfarenheter från vattenledningar av kopparrör säger att problem i vattenledningar av kopparrör som orsakats av avlagringar är ganska ovanligt (Vinka, 2003). Därav borde risken för inre skador vid låg flödeshastighet pga avlagringskorrosion vara nästintill obefintlig i fjärrvärmesystem med bra vattenkvalitet.

Mikrobiell korrosion

Mikrobiell korrosion är komplext. Grunden till att det uppstår är att alger eller till och med järnreducerande bakterier får fäste på metallytorna. Detta beror som regel på att jordbakterier har kommit in i rörledningarna i samband med byggnation. Gynnsamma förutsättningar för mikrobiell tillväxt är vid temperaturer under 40 °C, vid låga flöden, samt i system med neutralt pH (5-9).

I det mer passiva utförandet bildas ett isolerande skikt av organiskt material (exempelvis alger) på ytan. Detta skikt innebär en kraftigt försämrad värmeöverföring i värmeväxlare och pannor. Under detta skikt kan även en syrecell bildas vars kemi och följdverkningar beskrivits i tidigare avsnitt. Förloppet kommer alltså att likna det som sker vid exempelvis avlagringskorrosion.

Metallreducerande bakterier är korrosiva i sig själva. De delas in i olika grupper utifrån hur de verkar, exempelvis sulfatreducerande eller järnoxiderande. De sulfatreducerande lever i en syrefri miljö. Över korrosionsangreppet bildas järnsulfid och pH sjunker vilket bidrar till förstärkt korrosion. I mer syrehaltiga miljöer kan järnoxiderande bakterier förekomma. De kan skapa problem genom att så kallade tuberkler bildas vilket kan innebära igensättning av hela rörsystem.



Figur 9. Tuberkler i dricksvattenledning anno 1875. Lyckligtvis en ovanlig företeelse i svenska fjärrvärmenät.

Mikrobiell tillväxt kan avhjälpas/reduceras med tillfälligt förhöjd temperatur, ändring av $\text{pH} > 10,2$ eller genom tillsättande av biocider. (Storesund, 2015) (Underhållsgruppen, 2015)

Erosionskorrosion

Erosionskorrosion (strömnings-/turbulenskorrosion) uppstår när mediets flödes hastighet är så hög att det skyddande passivskiktet avlägsnas från rör eller

komponenter i fjärrvärmenätet. Degraderingen av passivskiktet sker snabbare vid exempelvis kavitation eller då slipmedel som sand/svetsslagg eller korrosionsprodukter följer med mediet. Förekomsten är vanlig där den lokala flödeshastigheten ökar som vid T-stycken, kopplingar, rörböjar, reduktioner och påstick, eller i pumpar. Då förekomsten kan vara relativt lokal kan man förvänta sig en högre korrosionsström och snabbare förlopp än vid exempelvis allmänkorrosion. Risken för erosionskorrosion ökar med minskad hårdhet. Rostfritt stål är exempelvis inte lika utsatt som kolstål. Sodahuskomitéens skadegrupp har rekommenderat att flödeshastigheten i matarvattenledningar (kolstål) ska hållas under 3,5 – 4 m/s, men det är naturligtvis den lokala flödeshastigheten som har betydelse för korrosionsförloppet. Det är därför viktigt att undvika onödiga kanter, utstick och riktningsförändringar för flödet i den mån det är möjligt. Sodahuskomitéen rekommenderar också att pH regelbundet bör ligga över 9,4 för att motverka korrosionsprocessen. Det är dock ett komplext problem där pH, syrehalt, material och flödeshastighet alla påverkar förloppet. (Carlsson, 2011) (Aghili, 1999) (Storesund, 2015) (Svenska värmeverksföreningen, 1985) (Nordvärme, Fjernvarmegruppen, 1990) (Vinka, 2003) (Bruno, 1988) Enligt Nordvärmes rapport (Nordvärme, Fjernvarmegruppen, 1990) är erosionskorrosion den främsta orsaken till skador på kopparmaterial i fjärrvärmesystem.

Spänningskorrosion

Spänningskorrosionssprickning (Stress Corrosion Cracking, SCC) orsakas av kombinationen mellan en korrosiv miljö samt att en **statisk** dragspänning, exempelvis från tidigare kallbearbetning, skapar en spricka i metallens yta. Det kan också uppstå som en följd av statisk belastning.

På grund av dragspänningen initieras sprickor i metallen. Det passiva ytskiktet skadas i anslutning till sprickan så att korrosion kan initieras. Potentialskillnaden och temperaturen påverkar korrosionsströmmen, liksom syrehalt, konduktivitet och pH. Risken för spänningskorrosion är högre i väte- och kloridrika miljöer samt vid förhöjda temperaturer. (Storesund, 2015)

Korrosionsutmattning

Korrosionsutmattning (Corrosion Fatigue, CF) är till skillnad från SCC orsakad av cykliska spänningar i stället för statiska. Här samverkar korrosionsprocessen med de cykliska spänningarna för att succesivt försvaga materialet. Till skillnad från ren utmattning är korrosionsutmattning inte kopplat till en fast utmattningsgräns. Brottgränsen och akuta skadeförlopp är därför mycket svåra att förutspå. För att minska risken för haveri bör ledningar förläggas på ett sätt så de cykliska spänningarna kan minimeras, exempelvis med hjälp av expansionsanordningar. (Storesund, 2015)

4.3.2 Vattenkvalitet

En allmän uppfattning är att invändig korrosion inte finns i fjärrvärmesystem. En anledning till det är att det finns ett skyddande skikt av magnetit i rören. En annan anledning är att det inte anses finnas syre i systemen eftersom de är slutna och rekommendationen är att behandlat vatten ska användas. Detta stämmer i ett slutet system eftersom korrosionen succesivt förbrukar syret och blir därefter försumbar. Men det finns andra faktorer som kan påverka syrehalten i systemets

vatten och magnetitskiktet på rörens insida på ett sätt som ökar risken för korrosion, utfällningar eller beläggningar.

Vattenkvaliteten har en avgörande inverkan på korrosionsuppkomsten. Som nämnts i avsnitt 4.3.1.2 *Korrosionsformer* beror korrosionen i första hand på mängden lösta ämnen, gaser lösta i vätskan, pH, temperatur, ledningsförmåga (konduktivitet), partikelinnehåll och organisk påväxt (bakterier, alger, mm). (Carlsson, 2011)

Då materialen i ett fjärrvärmesystem kan variera kan ett stort antal korrosionsprocesser uppstå, starkt förknippat med materialens korrosionspotential. De vanligaste materialen i fjärrvärmesystem är:

Kolstål: i rörledningar, ventiler och kondensortuber

Koppar: i rörledningar och värmeväxlare

Syrafast stål: i värmeväxlare och pumphjul

Rostfritt stål: i kompensatorer

AL-mässing: i kondensorer och värmeväxlare

Rödgods: i ventiler och pumphjul

Stålgjutgods: i pumphus, pumphjul och ventiler

Segjärn: i pumphus, pumphjul och ventiler.

(Underhållsgruppen, 2015)

Oavsett material kan korrosion i ett fjärrvärmesystem minimeras genom att följande grundläggande krav efterlevs:

- en låg syrehalt ger en låg korrosionshastighet
- en låg konduktivitet (salthalt) ger en låg ledningsförmåga som i sin tur ger en låg korrosionshastighet.
- Ett basiskt pH-värde. Vid höga pH-värden sker syreförbrukande korrosion, vilket är att föredra framför vätegasutvecklande korrosion som inträffar vid lågt pH.

Då dessa parametrar varierar geografiskt kan de lokala förutsättningarna påverka vilka insatser som krävs för att bibehålla en tillfredsställande vattenkvalitet. Förutsättningar skiljer i form av råvatten, tryck, temperatur och ut-/in-läckage samt förekomst av material och materialkombinationer. Vattenkvaliteten i fjärrvärmesystemen varierar från obehandlat råvatten till avgasat, totalt avsaltat vatten (Underhållsgruppen, 2015).

I Värmeforsk Rapport 958 "Riktvärden för vatten och ånga anpassade till svenska energianläggningar" (Hellman, 2006) finns rekommendationer för vattenkvalitet i fjärrvärmesystem. Rekommendationerna baseras på erfarenheter från drift av hetvattensystem med framledningstemperaturer mellan 70 och 180°C. De gäller för system med materialen stål, koppar och kopparlegeringar under normala driftsbetingelser. I Hellmans rapport finns också en sammanställning och förklaring av begrepp kopplade till spädvattenkvalitet. Förutom avhärdning och avsaltning poängterar Hellman vikten av att minimera mängden tillfört syre i systemet, antingen genom avgasning av eller minimering av tillfört spädvatten.

Vid byte av vattenkvalitet, tex från avhärdat till avsaltat vatten alternativt från obehandlat till avhärdat eller avsaltat vatten kan övergångsproblem uppstå pga att

befintliga passivskikt och avlagringar kan lösas upp. (Nordvärme, Fjernvarmegruppen, 1990)

4.3.2.1 Föroreningar i vatten

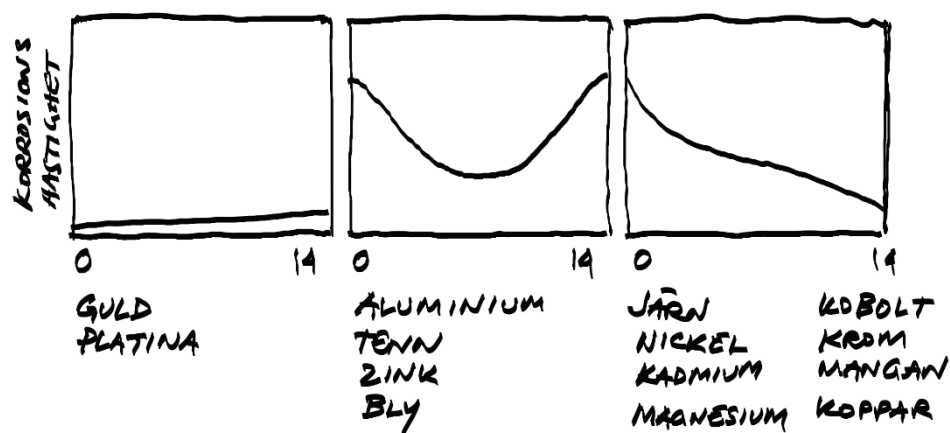
pH

pH-värdet är en viktig parameter i all vattenkemi då det ger information om vattnets karaktär, tex;

- • är vattnet korrosivt eller ej
- • föreligger det risk för beläggningsbildning
- • vilken miljöpåverkan som vattnet har
- • ligger det inom riktlinjerna för vattenreningsanläggningen

(Hellman, 2015)

Korrosionshastigheten vid olika pH skiljer sig för olika metaller, se Figur 10.



Figur 10. Samband mellan korrosionshastighet och pH för olika metaller (Alström, 2019)

I Figur 10 ser man exempelvis att Zink har en tendens att korrodera vid högt pH. Zink lakas därför ur mässingskomponenter. Följden av för höga pH halter kan därmed medföra att exempelvis styrventiler i fjärrvärmecentraler, som kan vara tillverkade i mässing, succesivt upplöses (Underhållsgruppen, 2015).

Figur 10 visar också på en avtagande korrosionshastighet med stigande pH för de vanligt förekommande materialen järn och koppar. Korrosionshastigheten relativt pH skiljer sig dock åt materialen emellan. Lösligheten av järn minskar med ökande pH-värde och vid ett pH-värde kring 9,5 kan angreppshastigheten normalt försummas (Hellman, 2015).

Samtidigt rekommenderas ett pH-värde mellan 8,0 och 9,0 för att undvika korrosion i dricksvattenledningar av kopparrör. (Vinka, 2003). Närapå samstämmiga uppgifter återfinns i en rapport från SKI (Aghili, 1999) Där rekommenderas ett pH-värde i intervallet 8,8-9,2 i system bestående av både koppar- och stålkomponenter.

Som passivskikt föredras magnetit före hematit eftersom hematitskiktet är mer lösligt och ger ett sämre skydd. I pH-området 9,6-9,8 råder goda förutsättningar för magnetitbildning. Under 9,3 sker en begynnande bildning av hematit och den ökar med sjunkande pH. (Hellman, 2015). Det blir utifrån dessa rapporter därför svårt att lägga sig i ett intervall där förutsättningarna samtidigt är optimala för låg korrosionstakt och gynnsamma för tillväxt av ett passivskikt i form av magnetit.

Aghilis och Vinkas rekommendation för pH i system med kopparrör skiljer sig från Hellmans rekommendation för pH i fjärrvärmesystem (9,5-10 för avsaltat eller avhärdat spädvatten och 8-9 för obehandlat spädvatten). Orsaken till detta kan vara att deras rekommendationer gäller olika typer av system. Det viktiga är att vattenkvaliteten anpassas för det aktuella systemet.

Konduktivitet

En hög konduktivitet (ledningsförmåga, salthalt) innebär en högre reaktionshastighet. Konduktiviteten kan också mätas för att upptäcka förändringar i vattenkemin (Hellman, 2015) (Underhållsgruppen, 2015). En studie av korrosionshastighet på rör i rostfritt stål (Li, Zhang, & Cheng, 2017) visade att korrosionshastigheten ökade från 0-10 m/s och att den därefter avtog på grund av bildandet av ett gränsskikt (turbulens) nära rörväggen. Mediet var vatten med 3,5% NaCl. De högre flödeshastigheterna i denna studie är inte relevanta för fjärrvärme, men det är intressant att se att flödeshastigheten påverkar jontransport och korrosionshastighet.

Hårdhet

Mängden kalcium och magnesium, styr vattnets hårdhet. De är svårslösliga i vatten och bildar beläggningar. Vid uppvärmning faller kalcium ut som kalciumkarbonat vilket fäster på de varmaste ytorna i systemet. (Hellman, 2015)

Syre

Syre i vattnet är en av de grundläggande orsakerna till korrosion på flertalet metaller. Syre måste avlägsnas ur vattnet för att minimera problem med korrosion.

Syrehalten är inte homogen i ett större system. Lokala inläckage kan exempelvis förorsaka korrosion inom ett begränsat område, samtidigt som korrosionsprocessen i sig själv förbrukar syret.

Källor till inläckage av syre (luft) i ett fjärrvärmesystem kan tex. vara:

- påfyllning med oavgasat vatten
- öppna expansionskärl eller ackumulatortankar
- inläckage via undercentraler med högre sekundära tryck än primära
- snabbfyllning med brandslang

(Hellman, 2015)

Enligt Aghili (Aghili, 1999) når magnetitens löslighet ett maximum i vatten med mindre än 3 ppb O₂ vid ca 100 °C. Först när syrehalten överskrider 15 ppb O₂ är uppbyggnad av ett fullständigt skyddande magnetitskikt och en effektiv minskning av järnhalten i vätskan, möjligt. Andra källor tex Uhlig och Revie (Uhlig & Revie, 2008) anger att detta sker vid högre gränser så det är viktigt att vara påläst i ämnet. För att säkerställa att syrehalten i ledningsnätet hålls på lägsta

möjliga nivå rekommenderas att en avgasare installeras. (Rindelöv, 2015). I fjärrkylenet kan vakuumavgasning användas för att undvika uppvärmning av kylmediet. Det är extra viktigt där eftersom kallt vatten binder mer syre än varmt. (Hellman, 2015)

Fasta partiklar

Halten av fasta partiklar ska vara så låg som möjligt för att undvika igensättningar och erosion. Vid projekteringen är det viktigt att utforma konstruktionen på ett sätt som minskar risken för att erosion eller igensättning pga partiklar uppstår. Det kan tex gälla strömningspåverkande detaljer eller utformning av avgreningar där understick ska undvikas.

Fasta partiklar i fjärrvärmenätet utgörs av utfällningar och korrosionsprodukter samt slagg, grus och annat från montaget. Halten ska vara så låg som möjligt för att undvika igensättningar och erosion. Kopparspån kan bilda en galvanisk cell där en accelererad korrosion kan uppstå. Det är anledningen till att det är av vikt att följa rekommendationer som att ha en bra vattenkvalitet, installera avgasare, installera ett eller flera delströmsfilter med magneter i systemet och att vara noga med rörrensning vid byggnation av ledningar (Hellman, 2006; Underhållsgruppen, 2015).

5 Erfarenheter från nätägare

I Sverige finns det cirka 200 fjärrvärmeföretag som äger fjärrvärmenät på olika orter. Dessa nätägare har mångåriga erfarenheter angående problem med ljud, partiklar och inre skador i distributionsnäten.

En kartläggning av dessa erfarenheter genomfördes genom en enkät. För att få ett så stort underlag som möjligt fick vi hjälp av Energiföretagen att via deras kanaler nå ut till nätägarna, såsom deras nyhetsbrev och direkt mail till flera personer inom företagen.

Projektgruppen tog även direktkontakt med ett antal personer hos nätägande företag.

5.1.1 Resultat i enkät angående ljud

Resultatet angående ljud i fjärrvärmenäten blev som väntat att det är i villor som problem med ljud framför allt uppmärksammas. Av 25 svaranden angav 20 att ljudproblem förekom i villor. Där fanns också tre svaranden med ljudproblem i flerfamiljshus, en med ljud i offentlig lokal och en som svarat att ljudet kunde lokaliseras i annan fastighetstyp. Dessa iakttagelser viktas förmodligen av att man i villor befinner sig närmare ljudkällan än i flerfamiljshus. Man har förmodligen även lägre toleransnivå för buller i sitt hem jämfört med när man vistas i offentliga lokaler. Av de tillfrågade upplevde 68 % problem i en fjärrvärmecentral, 16 % i en ledning/servis och 16 % uppgav att problemet uppstått på annan plats.

Angivna orsaker till ljud som uppstått i ledning/servis är:

- konstruktion av inomhusledning utan expansionsupptagande anordningar
- för högt topplastuttag från ledning med korrugerat medierör
- tillfälligt högt topplastuttag samtidigt som snabb sänkning av utomhustemperaturen.

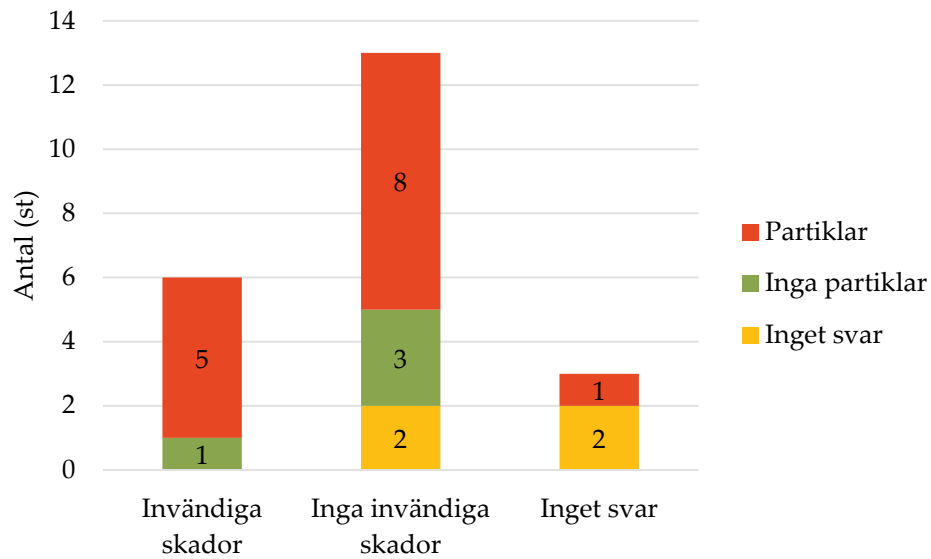
Medan orsakerna på annan plats är angivna som:

- okänd orsak i kundägt sekundärnät
- högt differenstryck i nätdelar direkt efter en tryckstegringspump

De komponenter i fjärrvärmecentralen som orsakar problem utöver cirkulationspumpar visade sig i denna studie vara reglering och styrventil för tappvarmvatten (41%), eventuell rundgångs-/bypassventil (24 %), samt reglering och styrventiler för värmekretsen (23 %). Man kan alltså från dessa enkätsvar sluta sig till att det i första hand är ventilerna som orsakar ljud i värmesystemet och inte serviserna i sig själva.

5.1.2 Resultat i enkät angående invändiga skador och partiklar

Resultatet angående invändiga skador och partiklar i fjärrvärmenät framgår av Figur 11.



Figur 11. Invändiga skador och förekomst av partiklar i fjärrvärmevattnet

De invändiga skadorna är beroende på korrosion (2 st), erosion (2 st) och ej angivet (2 st).

Partiklarna är i flera fall av en blandning av magnetit (10 st) tätt följt av rester från byggnation, tex svetsrester, grus, jord, sten och olika typer av "instoppade" främmande föremål (8 st).

6 Erfarenheter från leverantörer

Leverantörer av material och tjänster har många års erfarenheter angående problem med ljud, partiklar och inre skador i distributionsnäten.

Deras erfarenheter har kartlagts genom intervjuer och sammanställts i detta avsnitt.

6.1 ERFARENHETER ANGÅENDE LJUD

Bland intervjupersonerna är erfarenheter från ljud pga anläggningsdelar betydligt vanligare än ljud pga flödes hastigheter.

6.1.1 Ljud flödes hastighet/tryckfall

Erfarenheter från en av intervjupersonerna berättar om en tydlig stigande skala där de primära fjärrvärmeledningarna normalt är de tystaste systemen med minst ljud. Därefter kommer de sekundära ledningarna för värme som följs av de sekundära ledningarna för varmvatten. Sist med mest ljud är ledningarna för varmvattencirkulation i en fastighet som susar mycket pga små rör och höga flöden

En erfarenhet från en annan intervjuperson säger att det är ovanligt med ljud i ledningar. Men att då ljud förekommer så uppstår det ofta i stamledningar vid flöden $> 2\text{ m/s}$ och mycket lägre än så i klena servisledningar.

6.1.2 Ljud kopplat till anläggningsdelar

Självsvängningar/resonansljud är vanligare i kopparrör. Cu-flex ledningar ger ofta akustiska fenomen med ljudande toner, troligen pga att materialet är mjukare.

Godstjockleken i kopparrör är mindre än stålrör. Det är samma dragna mjukglödade kopparrör i Aquawarm som i Cu-flex. Däremot skiljer sig materialet i detaljer/komponenter.

Hårda kopparrör används i sekundärledningar.

Dimensionsförändringar, avgreningar, slag och lyror kan låta men är i normalfallet förvånansvärt tysta. Det förekommer dock att resonansljud som uppstår efter 90° och 45° böjar fortplantar sig in i hus.

Expansion av fasta system sker i en slip-stickrörelse, vilket gör att röret "hoppar till" för att sedan stanna i ett nytt läge. Därav kan expansionsrörelser höras väl. Detta gör att korrekt utformade expansionsupptagande lösningar och väggenomföringar är viktiga.

Ofta låter även expansionsrörelser i byggnadselement av metall och betong mycket. Ledningen och kammaren kan då bli som en högtalare.

Pumpar, framför allt tryckstegringspumpar, kan höras ibland.

Skillnad i ljudbild mellan fullflödesventiler och standardventiler är marginell. Men detta har ingen betydelse i servisledningarna eftersom ventiler i små dimensioner bara finns i utföranden som fullflödesventiler.

Däremot uppstår oftast ljud i ventiler om den pga felande funktion inte går att öppna helt.

En kulventil som inte går att öppna helt låter mycket vid höga flöden.

Orsaken till att ett spjäll inte låter i öppet läge antas bero på att skivan är mitt i flödet. Då en kula inte är helt öppen störs flödesbilden längs rörväggen vilket antas öka turbulens och risk för kavitation.

Vid anbörning kan montören vid proppning av anbörningsventilens ventilspindel påverka dess läge så att kulventilen stängs en aning. Denna oavsiktliga strypning kan både orsaka ljud och begränsa leveranskapaciteten. Samma händelseförlopp kan inträffa med s.k. engångsventiler.

Rundgångar, med kraftigt minskad dimensionsändring, låter ofta mycket och fortplantar sig långt, upp till 200 m från ljudkällan.

Även främmande material som kommit in i samband med byggnation såsom pallningsvirke, svetselektroder och skräp kan låta mycket.

6.2 ERFARENHETER ANGÅENDE INRE SKADOR

Kopparrör har en maximal flödeshastighet angiven pga att koppar är mjukt och känsligt för förslitning. Vid höga flödeshastigheter uppstår risk för erosion i böjarna.

Slam med kopparspån i en ficka ger galvanisk korrosion och kopparspånen "äter sig" ut.

Induktiva mätare får i vissa fall beläggning av koppar på mätytorna.

7 Mätningar

Som komplement till den teoretiska studien utfördes ett antal mätningar vid RISEs Riksmätplats för Volym och Flöde i Borås under våren 2021.

7.1 FRÅGESTÄLLNINGAR

Idag är branschpraxis vid dimensionering av servisledningar en maximal flödeshastighet av 1 m/s eller ett tryckfall på 100 Pa/m. Uppdraget i denna rapport är att ifrågasätta denna branschpraxis?

Utifrån kartläggningen av erfarenheter angående ljud beslutades att följande frågeställningar skulle undersökas i RISE laboratorium:

1. Bör systemet dimensioneras utifrån flöde eller tryckfall?
2. Finns det möjlighet att tillåta högre flödeshastigheter och tryckfall utan att ljudnivån påverkas?
3. Påverkas dimensioneringen av materialvalet?
 - Flödeshastighet i stålrör 21,7/20 och 22,9/20
 - Flödeshastighet i Cu-flex 22/20 och 28/25,6
 - Flödeshastighet i stålflex 25/21 och 28/24
4. Skiljer sig olika varmhållningsventiler åt?

7.2 UTFÖRANDE

Nivåmätningar av luftburet ljud sker normalt i laboratoriemiljö under strikt kontrollerade former. Vanligtvis använder man en akustisk kammare, där störningar kan skärmats bort och en kontrollerad ljudmiljö säkerställas. I den här studien har vi på grund av de tekniska förutsättningarna valt ett annat tillvägagångssätt.

Sex rör av varierande typ och dimension monterades i stället på en akustiskt dämpad betongvägg, se Figur 12. Betongväggens utformning baserades i så stor utsträckning som möjligt på standarder för stomljuds vibrationer (European Committee for Standardization, 2009) och mätning av buller från installationer för avloppsvatten (Svenska Institutet för Standarder, 2019). Enligt den senare standarden provas avloppsinstallationer vertikalt monterade på en vägg i en akustisk kammare. För att upprätthålla tillräckligt stabila flödesbetingelser (temperatur/tryck/hastighet) under mätningarna, genomfördes de istället med en horisontell installation av röret i RISEs flödeslaboratorium. Alla mätningar utfördes med en vätsketemperatur på 40 °C av arbetsmiljöskäl, efter överenskommelse med projektets referensgrupp.

De akustiska förutsättningarna i laboratoriet medförde dock att luftburet ljud och ljudnivåer blir svåra att mäta på ett tillförlitligt sätt. Som jämförande nyckeltal valdes i stället vibrationshastighet. Med accelerometrar fästa på rör och vägg ger vibrationshastigheten ett relativt mått på rörens och komponenternas förmåga att leda och generera vibrationer.

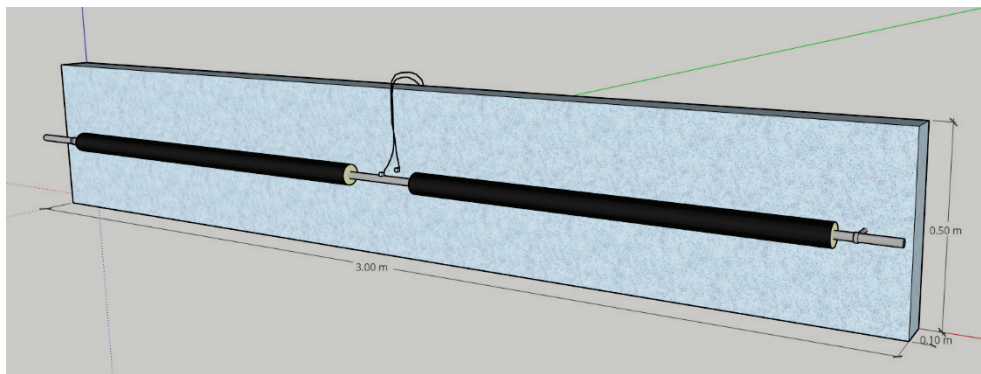
Att jämföra rören med avseende på vibrationshastighet i stället för acceleration är också gynnsamt ur ett mättekniskt perspektiv i det här fallet då en sådan mätuppställning är något känsligare för frekvenser i mellanregistret.

Vibrationshastigheten, v , förhåller sig till accelerationen, a , som

$$v = \frac{a}{2\pi f} \quad (11)$$

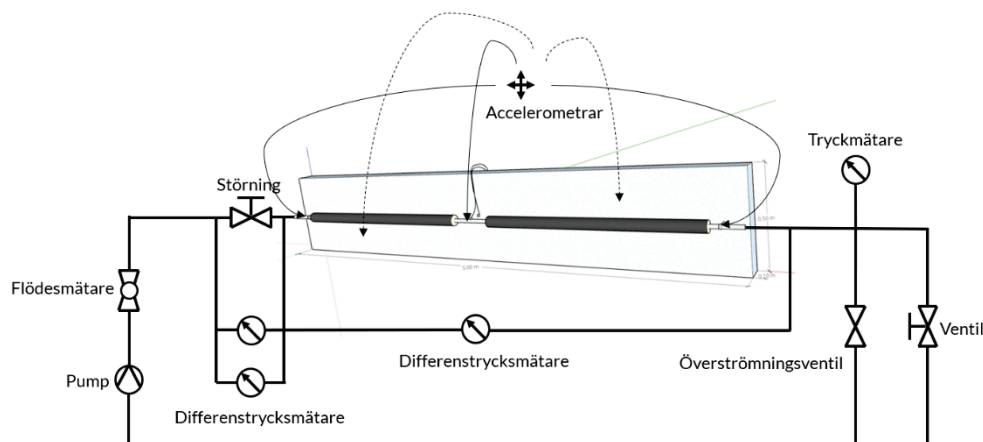
där f är frekvensen. Det blir tydligt att vibrationshastigheten förstärks i förhållande till accelerationen då frekvensen återfinns i nämnaren.

Eftersom de olika installationerna jämförts utifrån vibrationsnivåer i rör och vägg och flödesriggen avluftats inför mätningarna förväntas den horisontella installationen endast ha en marginell påverkan på resultaten.



Figur 12. Illustration av teststräckan

Betongväggens dimensioner uppgick till 3x0.5x0.1 m. Väggen var armerad och hade en densitet av 2300 kg/m³. Den placerades på akustiska dämpplattor för att isoleras från interaktion med omgivningen och stagades i sidled med dämpplattor fästa på solida stöd.

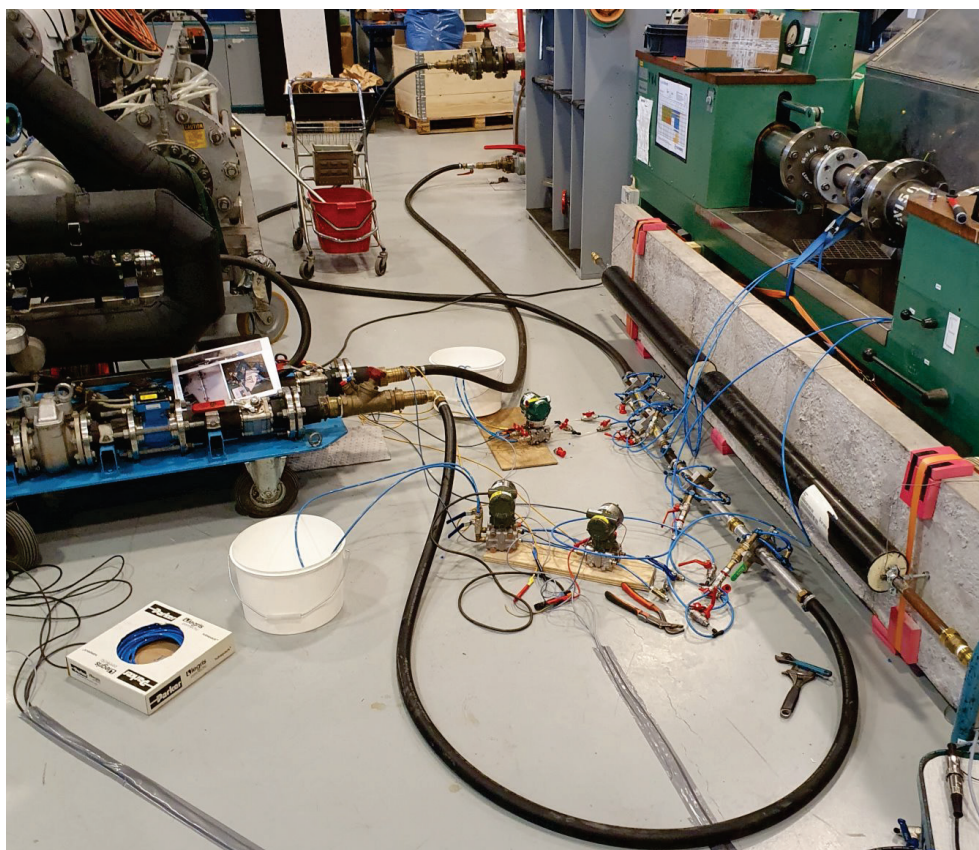


Figur 13. Schematisk skiss över testuppställningen. Vid test av varmhållningsventiler V1 och V2 ersatte dessa den snedställda kulventilen benämnd "Störning".

I två punkter, 250 mm från väggens kortsidor fästes genomgående gängstavar med mutter på var sida betongväggen. I änden av dessa monterades rörklammer på vilka de sex rören i tur och ordning fästes med momentnyckel för att åstadkomma en reproducerbar montering.

Uppströms teststräckan genererades flödet med en frekvensstyrd pump. Flödet passerade en Micro Motion CMF050 flödesmätare. Före teststräckan monterades en störning i form av en snedställd kulventil för att generera mätbara vibrationer. Kulventilens läge ändrades inte under vibrationsmätningarna på de sex rören. Mätresultaten utgör en relativ jämförelse mellan de olika rören och deras förmåga att leda vibrationer. Vid test av de två varmhållningsventilerna, V1 och V2, ersattes kulventilen av dessa.

Tryckfallet mättes med tre Yokogawa differenstrycksmätare över de komponenter som testades (rör och ventiler). Över komponenter och kulventil placerades två mätare parallellt med mätområde 500 och 1000 kPa för att erhålla en bra mätosäkerhet i kombination med ett brett mätområde. Mätaren för differenstrycket över de testade rören hade ett mätområde på 10 kPa. Differenstrycket mättes också vid motsvarande flöden över mätrören själva för att i efterhand subtrahera de differenstryck som skapas i mätrören, se Figur 14.



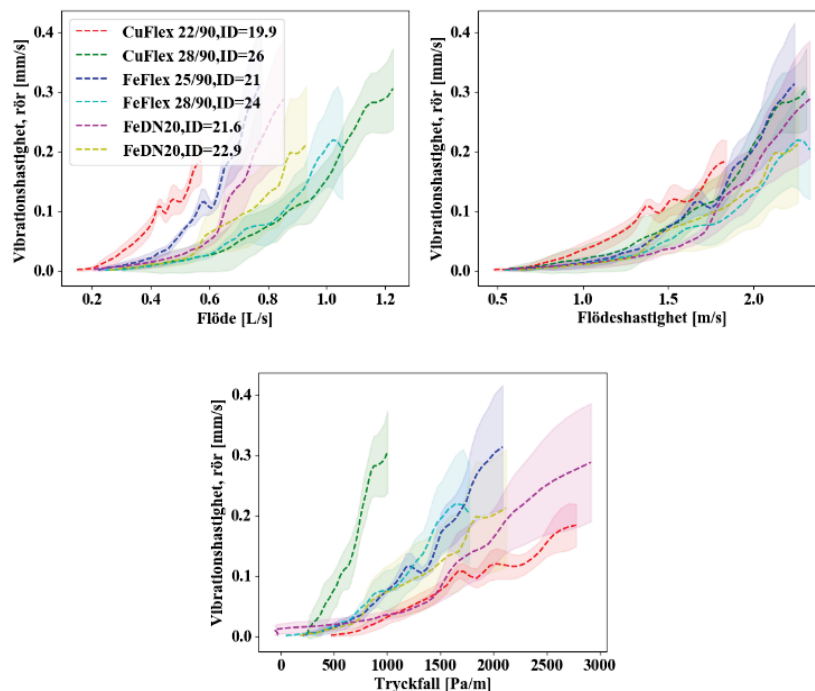
Figur 14. Förberedelser inför vibrationsmätningar i RISEs flödeslaboratorium. En av ledningarna är monterad på den akustiskt dämpade betongväggen. Mätning av tryckfallet över differenstrycksutrustningen pågår.

Vibrationer registrerades vid de två upphängningspunkterna, samt mitt på röret med Brüel & Kjær 4507 accelerometrar och i två positioner på baksidan betongväggen med accelerometrar av typen PCB 393C. Dessa har förhållandevis hög känslighet och lågt egenbrus vilket var lämpligt då betydligt lägre vibrationshastigheter förväntades i väggen än i röret. På så sätt kunde även stomljudsvibrationer analyseras.

Flödet stegrades med den frekvensstyrda pumpen enligt ett förinställt program under vilket signaler från flödesmätare, differenstrycksmätare och accelerometrar samplades synkroniserat i ett Siemens LMS Scadas XC datainsamlingssystem. RMS (Root Mean Square) för de akustiska signalerna beräknades med frekvensen 1 Hz.

7.3 RESULTAT

Figur 15 visar den medelvärdesbildade vibrationshastigheten från de tre accelerometrarna som var fästa på rören. De streckade linjerna representerar medelvärdet från tre körningar på ett rör och den skuggade arean bakom linjen representerar motsvarande spridning. Till vänster ses vibrationshastigheten i relation till flödet, i mitten i relation till flödeshastigheten och till höger i relation till tryckfallet. Tryckfallet är angivet i Pa/m . Då ledningarna hade en längd av 3 m var i praktiken de uppmätta differenstrycken tre gånger större.

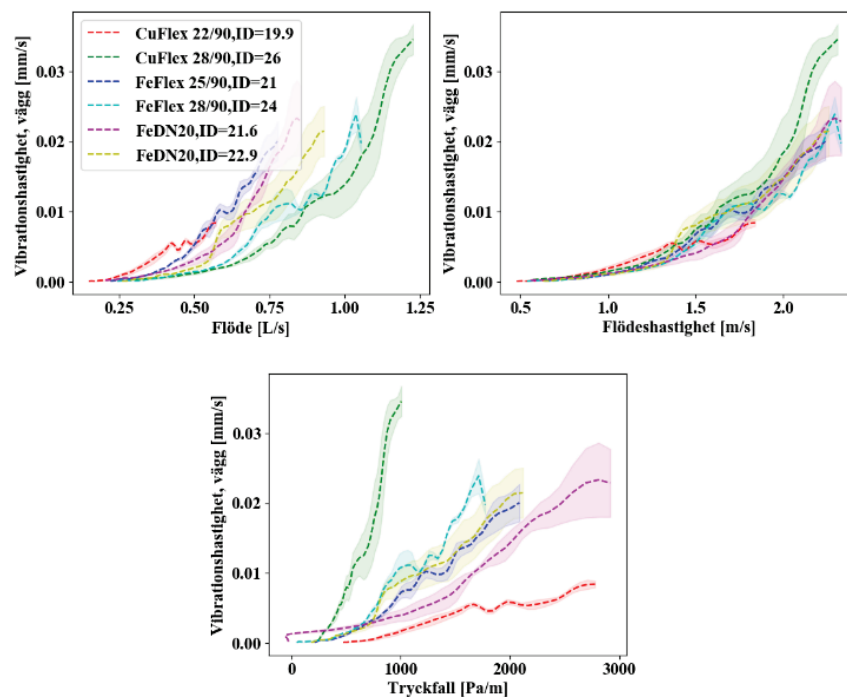


Figur 15. Medelvärdesbildad vibrationshastighet för olika rör

I Figur 15 kan det utläsas att vibrationshastigheten ökar med ökande flödeshastighet. Upp till en flödeshastighet av ca 1,5 m/s uppvisar alla rör en kontinuerligt stigande vibrationshastighet. Däröver ses vibrationsnivåerna öka något snabbare.

Spridningen i resultaten är så pass stor att det är svårt att uttala sig om några signifikanta skillnader i rörens transmissionsegenskaper vad gäller ljud. Vi ser att innerdiametern eller tvärsnittsarean har betydelse. Ett smalt rör tenderar att nå högre vibrationsnivåer vid ett lägre massflöde än ett rör med större dimension. Ett grövre rör blir dock relativt sett känsligare för höga tryckfall på grund av att det då också innebär att man har ett högt massflöde. Vibrationshastigheten ses vara kopplad till rörelsemängden. På grund av de fysiska förutsättningarna i laboratoriet nådde vi inte upp i flödeshastigheter över 2,7 m/s samt tryckfall över 2,8 kPa/m. Vi ser att vibrationsnivåerna börjar nå upp mot 0,4 mm/s i rören vid dessa driftsförhållanden. 0,4 mm/s beskrivs som den undre gränsen för amplitudintervallet "måttlig störning" i SS 4604861 (Svenska Institutet för Standarder, 1992).

Figur 16 illustrerar också data från tidigare beskrivna körningar, men dessa resultat härstammar från de två accelerometrar som var fästa på betongväggen.

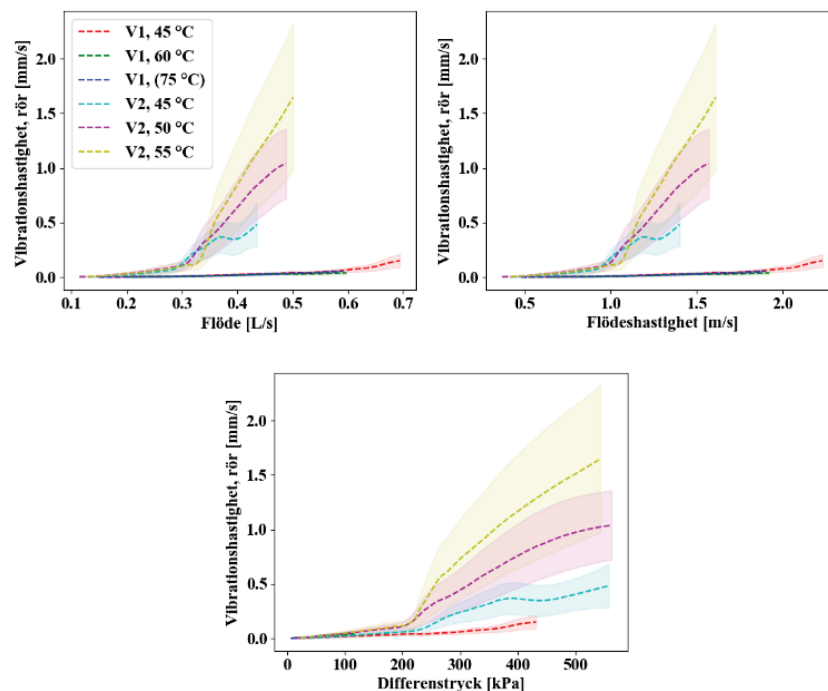


Figur 16. Medelvärdesbildad vibrationshastighet i vägg ansluten till olika rör

I denna figur kan man göra samma iakttagelser som i Figur 15. Det blir ännu tydligare då spridningen är lägre mellan de olika mätningarna. Intressant att notera är att vibrationsnivåerna inte blir entydigt större för ökande flöde. Det finns en viss oscillation i kurvorna. Detta har inte analyserats, men vi misstänker att det finns ett frekvensberoende här. Flödet genererar ett brett spektrum av frekvenser och vid olika hastigheter kommer frekvensinnehållet förändras. Försökuppställning och signalbehandling kan komma att filtrera/påverka de uppmätta vibrationsnivåerna till viss del. Därav tenderar signaler med ett visst

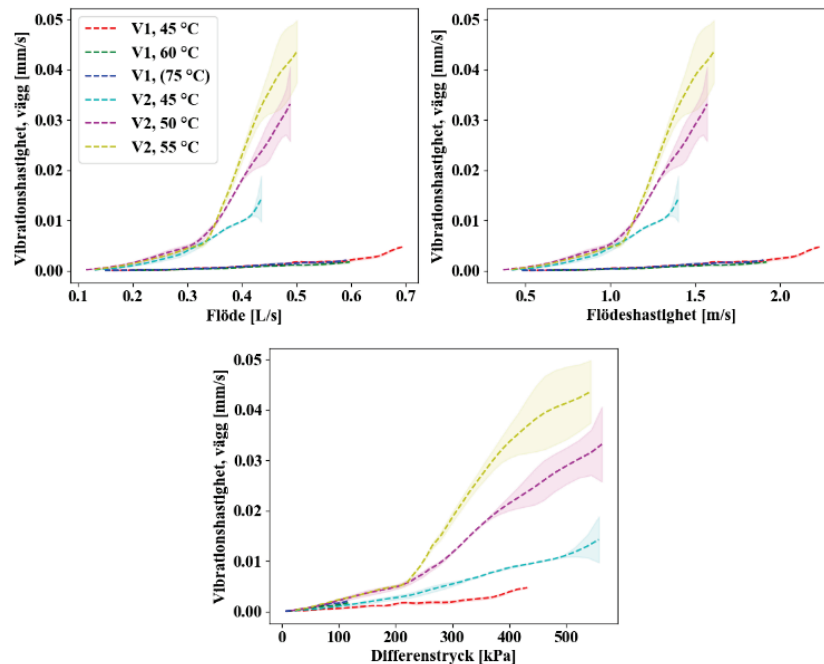
frekvensinnehåll att dämpas mer än andra. Det kan vara en förklaring till de krusningar vi ser i diagrammen.

I Figur 17 ses de uppmätta vibrationsnivåerna från de tre accelerometrar som var fästa på ett rör. Kurvorna representerar medelvärden från tre körningar per komponent som testats. De två komponenterna V1 och V2 är två varmhållningsventiler som är vanligt förekommande i svenska fjärrvärmenät idag men har olika högsta tillåtna temperatur och differenstryck. De skiljer sig även åt på andra sätt, exempelvis geometriskt.



Figur 17. Medelvärdesbildad vibrationshastighet i ett kopparflex 22/90-rör för två olika ventiler

Figur 18 redovisar i sin tur motsvarande vibrationsnivåer i rörväggen, registrerat av de två accelerometrar som var monterade på denna.



Figur 18. Medelvärdesbildad vibrationshastighet i vägg ansluten till ett kopparflex 22/90-rör för två olika ventiler

Figur 17 och Figur 18 åskådliggör en tydlig skillnad för de två testade varmhållningsventilerna. V1 har en avsevärt bättre karakteristik med avseende på vibrationer än vad V2 uppvisar. Vibrationshastigheten från V2 är starkt beroende av flödet medan V1 i princip är opåverkad av en ökad flödeshastighet inom det testade intervallet. Det här indikerar att ventilernas design skiljer sig åt till fördel för V1. Då vibrationerna når en nivå på 0.4 mm/s som kännetecknas som "måttlig störning" enligt SS 4604861, vid 1 m/s är det mycket intressant då det går att koppla till den branschpraxis för maximal flödeshastighet på 1 m/s för servisleddningar som vi hade i uppdrag att ifrågasätta.

Det är inte helt enkelt att översätta de uppmätta vibrationsnivåerna i laboratoriet till motsvarande ljudnivåer vid en installation i ett fjärrvärmesystem. Vi noterar däremot att vibrationshastigheten i rören nådde 0.4 mm/s strax över ett differenstryck på 200 kPa över V2.

8 Guide för dimensionering av servisledningar

Detta avsnitt beskriver de faktorer som påverkar dimensionering av servisledningar i fjärrvärmesystem avseende tryckfall och flödeshastighet.

Syftet är att ge projektören vägledning vid optimering av ledningens dimension.

Målet är att säkra en god leverans till kund, minska kostnaderna, värmeförlusterna och användningen av naturens resurser samt undvika förekomsten av ljud och inre skador.

8.1 FAKTORER SOM PÅVERKAR DIMENSIONERING AV LEDNINGAR

Detta avsnitt beskriver de faktorer som påverkar dimensionering av ledningar och möjligheten att optimera ledningars dimension.

Kundens behov och förbrukningsmönster

Det är förbrukningsmönstret i alla anslutna fastigheter som bestämmer aktuellt flöde, returtemperatur och effekt i fjärrvärmenätet. Därför är det viktigt att försöka få så bra uppgifter om detta mönster som möjligt från kund redan i projekteringsstadiet.

Kundens behov varierar med utomhustemperaturen och aktiviteter under dygnet.

Dimensioneringen baseras normalt på förutsättningarna vid maximalt behov vilket innebär då den lägsta utomhustemperaturen som är dimensionerande, dvs DUT, inträffar.

Fjärrvärmevattnets temperatur

Avkylningen i fjärrvärmecentralen påverkar tryckfallet i servisledningen. En hög avkylning ger ett lägre tryckfall i ledningen än om avkylningen är låg. Därför kan leverantörens rådighet över fjärrvärmecentralen ha betydelse vid dimensionering av servisledningen.

Även rundgångar i nätet kan öka tryckfallet i servisledningen eftersom de med sin kortslutning höjer flödet och returtemperaturen samt minskar temperaturdifferensen i nätet vilket ökar behovet av pumpning.

Vid dimensionering av ledningar långt ut i nätet kan även lägsta tillåtna framledningstemperaturen vid fjärrvärmecentralens primärsida bli styrande för tryckfallet och flödeshastigheten, för att undvika legionella. Detta med tanke på att regelverket kräver att varmvattentemperaturen är minst 50 °C vid kundens tappställe på sekundärsidan, vilken innebär att framledningstemperaturen vid leveranspunkten till fjärrvärmecentralen behöver vara 60 °C.

Ledningslängd

För att klara det lägsta tillåtna differenstrycket i fjärrvärmecentralen (1 bar) i ledningens ändpunkt kan tryckfallet behöva begränsas med ett val av större dimension om ledningen är lång.

För att klara den lägsta tillåtna temperaturen i fjärrvärmecentralen kan värmeförlusterna i ledningen behöva begränsas med ett val av mindre dimension om ledningen är lång. Detta för att undvika risken för legionella, se avsnitt om framledningstemperatur ovan.

Observera att det tillgängliga trycket och temperaturen kan variera om produktionsanläggningar finns i olika delar av nätet.

Material medierör

Ytråheten är högre i rör av stål än av koppar. Tryckfallet blir därför högre och ökar mer i rör av stål än av koppar.

Ytråheten kan förändras av bla beläggningar som uppstår i fjärrvärmesystemet, tex magnetit, vilket gör att den kan variera från rör till rör.

Galvanisk korrosion kan uppstå när två metaller med olika ädelhet står i ledande kontakt med varandra, tex stål och koppar, om det finns syre i medievattnet, som då både direkt och indirekt orsakar inre skador genom korrosion samt erosion pga korrosionspartiklar i vattnet vid högre flödeshastigheter.

Pumpkapacitet

Tryckökningen i pumpen-/arna måste vara högre än tryckfallet i ledningarna. Detta kan begränsa hur högt tryckfallet i ledningarna får vara.

Differenstryck

Vid utbyggnad i områden med lågt differenstryck i inkopplingspunkten behöver särskild hänsyn tas till accepterat tryckfall i ledningen vid dimensionering för att klara det lägsta tillåtna differenstrycket i fjärrvärmecentralen (1 bar).

Om det är omöjligt behöver åtgärder som ökar differenstrycket genomföras med tex en pump.

Om det högsta differenstrycket i fjärrvärmecentralen riskerar att överskridas måste åtgärder som minskar differenstrycket genomföras med tex differentryckregulatorer eller tryckväxlare. Det högsta differenstrycket bör inte överstiga 6 bar. I en del system kan det högsta differenstrycket vara begränsat till 4 bar pga att det finns anläggningsdelar och komponenter, i tex fjärrvärmecentraler, som orsakar ljudproblem vid högre differenstryck.

För att möjliggöra att styrventilerna i fjärrvärmecentralen ska kunna reglera optimalt anger F:101 att fjärrvärmeleverantören lämnar uppgifter på högsta och lägsta differenstryck vid leveransgränsen som underlag för dimensionering av fjärrvärmecentralen. Om aktuellt differenstryck ändras kan därmed styrventilerna behöva bytas ut.

Framtida förändringar

En optimerad dimensionering kan även innebära att hänsyn tas till framtida förändringar. Förändringar i nätet kan ändra förutsättningarna som en ledning dimensionerats efter. Om framledningstemperaturen höjs eller sänks förändras flödes hastigheten i hela nätet. Expansion av nya områden, generationsskifte i villaområden, sammankoppling av nät eller en ny produktionsanläggning med inmatning från ett annat håll kan förändra nätets tryckbild.

8.2 ORSAKER TILL LJUD, INRE SKADOR OCH ANDRA PROBLEM

I detta avsnitt beskrivs faktorer som kan orsaka störande ljud, inre skador och andra problem hos kund och som därför behöver beaktas.

Höjdnivå

Om ledningens trycknivåer över- eller underskrider systemets ramar kan ledningshaveri eller kavitation uppstå. I dessa fall behöver speciella åtgärder med tex pumpar eller tryckväxlare genomföras för att undvika detta.

Expansionsupptagande anordningar, genomföringar och rörupphängningar

Vid projektering av genomföringar i hus och upphängning av rör på väggar och i tak ska detta utföras på ett sätt så att risken för stömljud, pga fortplantning av eventuella vibrationer från rören, minimeras.

Avgreningar

Vid projektering av ledningar ska avgreningar med understick undvikas så långt som möjligt. Anledningen till detta är att mängden partiklar samlas i servisledningar med försämrade leveranser pga igensatta smutsfilter. En lokalt större mängd partiklar ger även en ökad risk för erosion vid höga flödes hastigheter.

8.3 VAL AV DIMENSION

Det sista momentet för att få fram servisledningens dimension är att besluta vad som är den optimala flödes hastigheten och tryckfallet genom att vikta dem mot fakta och avvägningar från faktorerna i avsnitten ovan.

Kopplat till denna guide har projektgruppen också skapat ett digitalt verktyg för dimensionering i projekteringsstadiet. Det finns tillgängligt via GitHub ([Länk till lathund](#)). Verket är implementerat i HTML och JavaScript och optimerat för användning i en vanlig webbläsare (Edge/Chrome). Källkoden släpps under en CC-BY-NC 4.0 licens. Det är därför tillåtet att dela och modifiera originalkoden om det görs utan kommersiella intressen och övriga regler kopplade till denna licens efterlevs.

I korta ledningar eller i ledningar med högt tryck vid inkopplingspunkten kan ett högre tryckfall bedömas som det optimala då det blir liten påverkan på det totala tryckfallet.

En för liten ledningsdimension och låga flödeshastigheter kan ge bristande leveranskvalitet till kund.

Resultatet i denna rapport är följande:

- Ett tryckfall på 100 Pa/m för ledningar i mindre dimensioner uppstår vid låga flödeshastigheter. Källan till denna branschpraxis är för oss fortfarande okänd, men vår känsla är att det är en vedertagen säkerhetsmarginal som visat sig fungera. Vi kan med fast övertygelse konstatera att den inte är relaterad till oljud i serviser.
- Vibrationshastigheten för två varmhållningsventiler vid olika flöde har analyserats. Vibrationshastigheten ökar kraftigt från en flödeshastighet på 1 m/s och ett differenstryck över ventilen på 200 kPa för den ena, medan den andra ventilen tycks vara helt opåverkad vid motsvarande förhållanden. Om nätagaren inte har rådighet över komponentval ska dessa värden inte överskridas.
- Vibrationshastigheten för rör ökade kraftigt från en flödeshastighet på 1,5 m/s. Om nätagaren har god kännedom om komponenterna i nätet och om konstruktionen utformas på ett sätt så att risken för stomljud minimeras borde denna flödeshastighet kunna tillåtas i raka rör utan risk att uppnå vibrationer i nivå med "måttlig störning" enligt SS 4604861 (Svenska Institutet för Standarder, 1992).
- Risken för att inre skador pga erosion uppstår är enligt erfarenheter och studier från andra tekniker vid flödeshastigheter större än 2 m/s i kopparrör och 3 m/s i stålrör. Om önskemål finns att dimensionera efter dessa flödeshastigheter behöver de faktorer som påverkar erosionens skadliga inverkan, såsom rörmaterial och vattenkvalitet, vara jämförbara med de i fjärrvärmesystem och verifierade genom mätningar.

9 Diskussion

Vad är en optimal flödeshastighet?

Målet är att ha en flödeshastighet som ger låga investeringskostnader och värmeförluster, men även säkrar leveransen till kunden samt minskar risken för störande ljud och slitage på komponenter. För att hitta denna flödeshastighet behöver de faktorer som kan påverka valet av ledningsdimension identifieras. Dessa faktorer skiljer sig mellan olika nät och kan även variera inom ett och samma nät. När faktorerna anpassats efter dessa förutsättningar kan den optimala flödeshastigheten tas fram och dimensionen för aktuell servisledning kan väljas.

Dagens branschpraxis för tryckfall är 100 Pa/m. Bakgrunden till den har inte hittats men vår känsla är att det är en vedertagen säkerhetsmarginal som visat sig fungera. Risken är att det medfört en överdimensionerad infrastruktur. När marginalen minskas behöver tryckfallet i nätets ledningar beaktas så att det inte blir större än den tryckhöjning som nätets pumpar kan ge. Om önskat tryck inte kan uppnås behöver en viktning mellan ledningsdimension och installations- samt driftkostnad för ny pump göras.

I mätningarna uppvisade de två varmhållningsventilerna stora olikheter i sina resultat. Detta indikerar inte helt oväntat att ventilernas design påverkar känsligheten för att vibrationer ska uppstå vid tuffare driftförhållanden. Vi rekommenderar en maximal flödeshastighet på 1 m/s i de fall nätägaren inte har rådighet över dessa komponenter. Denna flödeshastighet sammanfaller med rådande praxis. Den skillnad vi såg belyser också faktum att man med god kännedom om sina komponenter har möjlighet att dimensionera på ett "snävtare" sätt och därmed reducera investeringskostnaderna och överskrida 1 m/s i de fall det är lämpligt. Konstruktionsaspekter relaterat till varmhållningsventiler har inte undersökts inom ramen för de experimentella delarna av detta arbete.

Baserat på de resultat som framkommit under mätningarna rekommenderar vi en maximal flödeshastighet av 1,5 m/s i raka serviser. Vibrationsnivåerna har för rören legat under vad som betecknas som måttlig störning i SS 4604861 (Svenska Institutet för Standarder, 1992). Vår rekommendation utgår från en försiktighetsprincip och baseras på att vibrationshastigheterna ökade snabbare över 1,5 m/s. Däröver blir alltså osäkerheten större. Det är en höjning i förhållande till rådande praxis för serviser. Den primära källan till de uppmätta vibrationerna var förmodligen inte serviserna själva utan ojämnheter i anslutningar och ventil uppströms. Vi vill poängtera att detta var en relativ jämförelse mellan olika dimensioner av serviser för att analysera beroendet av faktorer som material och ledningsdimension. På samma sätt blir de faktiska vibrationerna i fält beroende av omgivande komponenter och hur servisen installerats i förhållande till dessa.

De erfarenheter vi har tagit del av angående ljud tyder på att orsaken oftast är anläggningsdelar eller komponenter och inte ledningarna. Ljud kan härstamma från expansionsrörelser, anläggningsdelar, kavitation, snedställda anbornings- och engångsventiler, rundgångar och främmande föremål. Vibrationer från komponenter i systemet fortplantas via rören och breder ut sig som stomljud. I

många fall kan dessa byggas bort om konstruktionen utformas på ett sätt som minskar risken för att ljud fortplantas. Det kan tex gälla expansionsupptagande anordningar, genomföringar i hus och upphängning av rör på väggar och i tak. Om ljud uppstått ska källan noggrant analyseras för att säkerställa att vibrationerna inte resulterar i framtida haverier. Om returledningens trycknivå underskrider gränsen för ångbildning kan ljud uppstå pga kavitation. Åtgärder måste genomföras för att undvika detta, tex med pumpar eller tryckväxlare.

Kavitationsintensiteten ökar med ökat differenstryck, vilket stämmer väl med teorin kring kavitation. Temperaturen påverkar förekomsten av kavitation på grund av det direkta temperaturberoendet hos förångningstrycket. Det är dock inte entydigt så att kavitationens följd effekter förvärras vid högre temperaturer. Detta kan vara värt att lägga på minnet exempelvis vid projektering för framtida lågtemperaturnät. Man bör skilja på risk för att kavitation uppstår, vilken följer temperaturen, samt konsekvensen av en höjd kavitationsintensitet vid lägre temperaturer. Det finns dessutom en svensk studie som indikerar att kavitationsintensiteten i ventiler påverkas av ventilens öppningsgrad. Men där visar man på det överraskande resultatet att höga öppningsgrader i kombination med höga differenstryck och höga temperaturer är gynnsamt för kavitation. (Johansson P.-O. , 2012) Det finns alltså inget som talar för att ämnet kavitation är uttömt vad gäller fortsatt forskning.

Förutom kavitation har vi gällande invändiga skador lagt stor vikt vid korrosion i den här rapporten. Anledningen är att det kan ge direkta skador, men även indirekta såsom erosionsskador pga utfällningar och korrosionsprodukter. En allmän uppfattning är att korrosion inte finns i fjärrvärmesystem. Men vad menar vi egentligen med det? Är det allmänkorrosion vi avser då? Finns det vissa korrosionstyper som går under radarn? Vi har redovisat de vanligast förekommande korrosionstyperna i fjärrvärmenät för att höja medvetenheten om möjliga korrosionsangrepp. (Tuberkklerna i vattenledningen anno 1875 får ses som ögongodis.)

En hög syrehalt och konduktivitet gynnar korrosionsprocessen medan pH-halten är mer komplex till sin natur.

Korrosionshastigheten för koppar avtar vid ett lägre pH än för stål. Det gör att pH-området som rekommenderas skiljer sig beroende på vilka material som finns i systemet. Även bildningen av passivskikt påverkas av pH-värdet. Vid högre pH, samma nivå som korrosionshastigheten för stål avtar, bildas magnetit. Medan det vid lägre pH, samma nivå som korrosionshastigheten för koppar avtar, bildas hematit. Att lägga sig i ett intervall där förutsättningarna samtidigt är optimala för låg korrosionstakt och gynnsamma för tillväxt av ett passivskikt i form av magnetit är därför svårt.

Det vi noterat är att olika studier skiljer sig åt, framför allt vad gäller rekommenderade nivåer för pH. Orsaken till det kan vara tex olika driftförhållanden vid försök, olika syften med projekten, olika material, stor mätosäkerhet, subjektivitet vid bedömning av korrosionsgrad. Med dessa osäkerhetsfaktorer inräknade kan man med ett vänligt sinne anse resultaten som relativt samstämmiga. Då det trots allt råder en viss osäkerhet kring pH kan vi

anta att korrosionsprocesserna skiljer sig åt i olika fjärrvärmenät utifrån de lokala förutsättningarna och driftsförhållandena hos respektive bolag. Detta visar varför det är viktigt att anpassa vattenkvaliteten efter det aktuella systemet.

Risken för erosion ökar med minskande hårdighet, dvs materialets hårdhet. Vi har därför funnit rekommendationer som skiljer sig åt för exempelvis kopparrör (2 m/s) och kolstål (3 m/s). De rekommendationer som gäller för koppar och kolstål kommer från erfarenheter och studier i vattenledningsnät och matarvattenledningar i pappersbruk. För att kunna dra en slutsats behöver de faktorer som påverkar erosionens skadliga inverkan, såsom rörmaterial och vattenkvalitet, vara jämförbara med de i fjärrvärmesystem och verifierade genom mätningar. Att beakta är att erosion gärna uppstår på ytor som påverkar strömningsriktningen; böjar, ventiler etc som i många fall kan vara gjorda i avvikande material. Det finns därför anledning att undersöka erosionskänsligheten för exempelvis syrafast och rostfritt stål, AL-mässing, rödgods, stålgiutgods och segjärn. Det är även bra att, om det är möjligt, välja de strömningspåverkande detaljer som ger minst risk för erosion vid projektering.

I resultatet från enkäten angående invändiga skador går det att se ett samband mellan partiklar och inre skador då 83 % av fjärrvärmenäten med inre skador har ett vatten som innehåller partiklar.

Det är däremot ingen självklarhet att partiklar orsakar inre skador eftersom 61,5 % av fjärrvärmenäten utan inre skador också har ett vatten som innehåller partiklar.

Överensstämmelsen i den här typen av resultat kan analyseras med en metod som heter Cohen's kapp, κ , vilket är vanligt förekommande inom maskininlärning (Wikipedia, 2021). $\kappa=0$ motsvarar ett totalt slumpmässigt utfall medan $\kappa=1$ motsvarar en exakt överensstämmelse. Analysen ger $\kappa=0.27$ vilket motsvarar en låg till måttlig koppling mellan invändiga skador och partiklar i vattnet. Då dataunderlaget får anses vara relativt litet får man betrakta dessa siffror som osäkra.

Om det finns någon koppling till ökad risk för avlagringskorrosion vid låga flödeshastigheter är inte fastställt i denna rapport. Litteraturstudien visar däremot att sannolikheten för specifik avlagringskorrosion i fjärrvärmenät är liten. Utifrån vår studie där olika korrosionsformer redovisats framgår det dock att gemensamma nämnare för korrosionsangreppen är tillgången till syre och potentialskillnader. Vi tänker oss att ett lägre flöde skulle kunna underlätta bildandet av syreceller och ändra lokala potentialskillnader vilket kan gynna flera korrosionsprocesser.

Det går att konstatera att det finns många faktorer att väga in och kan sannolikt vara föremål för fortsatt relevanta projekt.

10 Slutsatser

I litteraturstudien identifierades riktvärden för optimal flödes hastighet vid dimensionering vilka stämde överens med dagens branschpraxis med rekommenderad maximal flödes hastighet på 1 m/s för servisledningar, 2,5 m/s för stamledningar och 3,5 m/s överföringsledning. Det visade sig att dessa baserade sig på kostnadsnivån för anläggningens delar (rör, pumpar och produktionsanläggningar) och drift (bränsle och pumpenergi). Eftersom detta är en faktor som varierar både mellan olika system och inom samma system över tid och dessutom är 35 år gammal känns det högst relevant att ifrågasätta denna praxis.

Dagens branschpraxis för tryckfall på 100 Pa/m uppstår i ledningar med mindre dimensioner vid låga flödes hastigheter. Källan till denna branschpraxis är för oss fortfarande okänd, men vi kan med fast övertygelse konstatera att den inte är relaterad till ljud i serviser.

Risken för inre skador vid låg flödes hastighet pga avlagringskorrosion bedöms vara nästintill obefintlig i fjärrvärmesystem med bra vattenkvalitet. Detta grundas i resultat från litteraturstudien där erfarenheter från vattenledningar av kopparrör som säger att problem i vattenledningar av kopparrör pga avlagringar är ganska ovanligt.

Resultatet från mätningarna på den ventil vi benämnt V2, som tycks ha en betydligt sämre ljudmässig prestanda än V1, sammanfaller med rådande branschpraxis för maximal flödes hastighet på 1 m/s för servisledningar. Val av komponenter och utformning av expansionsupptagande anordningar, genomföringar i hus och upphängning av rör påverkar risken för att störande ljud uppstår. Om nätägaren inte har rådighet över komponentval och rörkonstruktion bör den övre gränsen med avseende på risk för ljud sättas vid 1 m/s.

Mätningarna indikerade att vibrations hastigheten hos rören och i väggen som rören är upphängda på ökar kraftigare efter en flödes hastighet på 1,5 m/s. Mätningarna skedde upp till en flödes hastighet av 2,8 m/s. Vi har satt en övre gräns med avseende på risk för ljud på 1,5 m/s i servisledningar. Det är gjort med försiktighetsprincipen. Det borde gå att stretcha det längre än så, men det vill vi inte göra, då vi inte har täckning för det i form av testresultat i den här studien. Det vi kan säga säkert är att vid 1,5 m/s kommer det inte vara någon av de raka rör vi testat som låter. Däröver ökar osäkerheten för när det börjar låta i och med att ökningen av vibrations hastighet blir starkare och att vi samtidigt närmar oss gränsen för måttlig störning enligt SS 4604861 (Svenska Institutet för Standarder, 1992).

Litteraturstudien visade att det, enligt erfarenheter och studier från andra tekniker, finns en ökad risk att inre skador pga erosion uppstår vid flödes hastigheter större än 2 m/s i kopparrör och 3 m/s i stålrör.

Gränsen för maximal flödes hastighet i servisledningar avseende inre skador pga erosion styrs av vattenkvaliteten och om partiklar blir kvar vid byggnation av

ledningarna samt konstruktionens utformning och strömningspåverkande detaljer. I litteraturstudien har det varit svårt att hitta välgrundade uppgifter som kan ge ett säkert värde för maximal flödeshastighet för att undvika erosion. Om önskemål finns att dimensionera efter dessa flödeshastigheter behöver de faktorer som påverkar erosionens skadliga inverkan, såsom rörmaterial och vattenkvalitet, vara jämförbara med de i fjärrvärmesystem och verifierade genom mätningar.

Klart är att ett mer dynamiskt sätt att dimensionera servisledningar är det mest optimala, jämfört med att använda branschpraxis, där dimension på servisledning anpassas och bestäms av den flödeshastighet och det tryckfall som nås genom viktning av de påverkande faktorerna i denna rapportens guide för dimensionering av servisledningar. Ledningsdimensionen anpassas på så vis till ledningens lokala/aktuella förutsättningar.

11 Framtida arbeten

Under arbetets gång har vi hittat följande frågeställningar som kan vara intressanta att mäta eller utreda mer:

- Att mäta eventuella skillnader i ljudbild mellan "fullflödes"-ventiler och standardventiler.
- Att mäta eventuella skillnader i ljudbild mellan olika styrventiler för värmeväxlare för värme och varmvatten i kundanläggningar.
- Att utreda om olika typer av isolering (tex PUR-skum vs mineralull) påverkar ljudet.
- Att fastställa rekommenderade maximala flödeshastigheter för fler material såsom syrafast och rostfritt stål, AL-mässing, rödgods, ståljutgods och segjärn i syfte att undvika erosionskorrosion.
- Att finna en balans mellan leveranssäkerhet, produktionsflexibilitet, pumpeffekt, investeringskostnader i distributionsnätet, skadefrekvens och risk för oljud.

12 Referenser

- Aghili, B. (05 1999). *Erosionskorrosion Rapport 99:29*. Hämtat från SKI:
<https://docplayer.se/14644620-Se9900318-ski-rapport-99-29-erosionkorrosion-behnaz-aghili-maj-1999-30-37-ski-issn-1104-1374-isrnski-r-99-29-se.html>
- Alström, J. (2019). *Slutna kyl- och värmesystem*. RISE via Kyltekniska The Swedish Society of Refrigeration.
- Arbetsmiljöverket. (2020). *Bort med bullret - en bra ljudmiljö lönar sig*. Hämtat från
<https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/broschyrer/bort-med-bullret---en-bra-ljudmiljo-lonar-sig-adi598-broschyr/>
- ASHRE. (2009). *Handbook-Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bertilsson, E., & Mowitz, M. (2002). *Säkerställande av god kvalitet i fjärrvärmevatten*. Borås: Högskolan i Borås.
- Boverket. (2013). Boverkets byggregler (2011:6) föreskrifter och allmänna råd - avsnitt 7:1, 7:21 och 7:22. *BFS 2013:14*. Hämtat från
<https://rinfo.boverket.se/bbr/pdf/bfs2013-14-bbr20.pdf>
- Brown, G. (den 31 08 2002). The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. *Proc. Environ. Water Resour. Hist.*, 38. doi:10.1061/40650(2003)4
- Bruno, F. (1988). *Erosionskorrosion i matervattenledningar*. Sodahuskommittéens skadegrupp.
- Carlsson, B. (2011). *Gasers inverkan på Energieffektivitet och Våtkorrosion i tekniska vätskesystem, anledningar och åtgärder*. Hämtat från
https://www.qtf.se/images/teknikbok/gasers_inverkan_pa_energieffektivitet.pdf
- Energiföretagen. (Februari 2014). F:101 Fjärrvärmecentralen - Utförande och installation. *Teknisk bestämmelse*.
- Energiföretagen. (Oktober 2019). D:211 Läggningsanvisningar för fjärrvärme- och fjärrkyleanläggningar. *Teknisk bestämmelse*.
- European Committee for Standardization. (2009). EN 15657-1. *European Standard*.
- Fichter, N. (2008). Kan man undvika att störas av strömningsljud från vattenburna kyl- och värmesystem? *Bygg & teknik 3/08*. Ramböll Sverige AB.
- Grundfos. (den 07 09 2021). *Kavitationen och dess effekter på pumpar*. Hämtat från
<https://www.grundfos.com/se/learn/ecademy/all-courses/basic-hydraulics-and-pump-performance/cavitation-and-its-effects-on-pumps>
- Hellman, M. (2006). *Rapport 958 "Riktvärden för vatten och ånga anpassade till svenska energianläggningar"*. Värmeforsk.
- Hellman, M. (2015). *Handbok i vattenkemi för energianläggningar Rapport 2015:113*. Hämtat från Energiforsk:
<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/18602/handbok-i-vattenkemi-foer-energianlaeggningar-energiforskrapport-2015-113.pdf>
- Johansson, B. (2002). Buller och bullerbekämpning. Arbetsmiljöverket. Hämtat från
<https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/bocker/buller-och-bullerbekampning-bok-h003.pdf> den 28 Maj 2021
- Johansson, P.-O. (2012). *Temperatureffektiva fjärrvärmesystem*. Fjärrsyn.
- Johansson, P.-O., & Wollerstrand, J. (2009). Kavitation i styrventiler - laboratorieundersökning. *Fjärrsynsrapport(2009:45)*. Svensk Fjärrvärme AB. Hämtat från <https://docplayer.se/10158016-Kavitation-i-styrventiler-rapport-i-2009-45.html>

- Kewen Peng, F. G. (2020). Interpreting the influence of liquid temperature on cavitation collapse intensity through bubble dynamic analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105253>
- Korrosionsgruppen. (2019). *Katodiskt skydd - Korrosionslära*. Hämtat från <https://korrosionsgruppen.se/wp-content/uploads/2020/01/Korrosionsl%C3%A4ra-2019.pdf>
- Li, Z., Zhang, J., & Cheng, J. (2017). The Influence of Critical Flow Velocity on Corrosion of Stainless Steel. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. doi:10.1007/s11668-017-0369-1
- Logstor. (2019). Projektering Version 2019.02. (Version 2019.02), Avsnitt 19.1.0.1.
- Maurin, G. (1986). *Värmekulverthandbok*. Svensk Byggtjänst.
- Nordvärme, Fjernvarmegruppen. (1990). *Korrosion och vattenbehandling i nordiska fjärrvärmesystem - Erfarenheter och praxis, Rapport RE-3/1990*.
- Powerpipe. (2021). Produktkatalog 2021:1. Avsnitt 9:201.
- Pumpportalen. (2021). 3.5 Pumpars sugförmåga, NPSH och kavitation. *Pumphandboken*. Hämtat från <https://www.pumpportalen.se/pumphandboken/pumpars-sugformaga-npsh-och-kavitation/>
- Regeringen. (den 31 Mars 2011). Plan- och byggförfordning. *Svensk författningssamling*, 2011:338, 3 kap, 13 §.
- Rindelöv, M. (2015). *Värdefulla ledningsnät Fjärrvärme- och VA-ledningar Rapport 2015:113*. Urban Magma.
- Simmons, C. (2009). *SBUF 11941 - Stomburet installationsljud, handbok C*.
- Simmons, C. (2011). *SBUF 12279 Rörsystem stomljud*.
- Storesund, J. (2015). *Handbok för livslängdsarbete med energianläggningar*.
- Svenska Institutet för Standarder. (den 09 09 1992). *Vibration och stöt - Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader*. Hämtat från <https://www.sis.se/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/vibration-med-avseende-pa-manniskor/ss4604861/>
- Svenska Institutet för Standarder. (2019). SS-EN 14366:2004+A1:2019 Akustik – Mätning i laboratorium av buller från installationer för . *SVENSK STANDARD*.
- Svenska värmeverksföreningen. (1985). *Kemi för fjärrvärmesystem*.
- Sveriges Riksdag. (den 1 Juli 2010). Plan. och bygglag. (2010:900), 8 kap, 4 §. Hämtat från <https://www.boverket.se/sv/lag--ratt/lagar-for-planering-byggande-och-boende/plan--och-bygglag-2010900/> den 27 Maj 2021
- Tiborn, M. (den 21 Februari 2019). Exploderand bubblor. Chalmers. Hämtat från <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/m2/nyheter/Sidor/Exploderande-bubblor.aspx> den 27 Maj 2021
- Uhlig, H. H., & Revie, R. W. (2008). *Corrosion and Corrosion Control, 4th edition*. John Wiley and Sons, Inc.
- Underhållsgruppen. (2015). *Underhållshandboken för fjärrvärmedistribution*. Svensk fjärrvärme.
- Vinka, T.-G. (2003). *Genomfrätningar på kopparrör - orsaker, undersökningsmetoder och motåtgärder*. VA-Forsk.
- Wikipedia. (den 30 December 2020). Kavitation. Hämtat från <https://sv.wikipedia.org/wiki/Kavitation>
- Wikipedia. (2021). *Cohen's kappa*. Hämtat från https://en.wikipedia.org/wiki/Cohen%27s_kappa
- Xylem. (08 2015). *Pump cavitation and how to avoid it*. Hämtat från https://www.xylem.com/siteassets/support/case-studies/case-studies-pdf/cavitation-white-paper_final-2.pdf

DIMENSIONERING AV SERVISLEDNINGAR I DISTRIBUTIONSSYSTEM

En sedan länge vedertagen branschpraxis är att man håller sig under en flödes-hastighet på 1 m/s och ett tryckfall på 100 Pa/m i servisledningar. Syftet med branschpraxis är att kunder inte ska utsättas för höga ljudnivåer och att ett ökat slitage på komponenter ska undvikas.

I den här rapporten ifrågasätter vi en branschpraxis som legat till grund för dimensioneringsarbetet i minst 35 år. Intressanta fakta från litteraturen lyfts fram. Erfarenheter från nätägare och leverantörer vävs samman med praktiska experiment i ett flödeslaboratorium. Vi utreder var de faktiska gränserna går för dimensionering och framhåller att ett mer dynamiskt förhållningssätt är gynnsamt ur flera perspektiv.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin.



Energiforsk