

ATT FINNA LÄCKOR I VATTENDISTRIBUTIONSLEDNINGAR UNDERLÄTTAS MED KÄNNEDOM OM DERAS LJUDEGENSKAPER

Finding leaks in water distribution pipes is made easier with knowledge of their acoustic properties

av GÖSTA LANGE, Ultrac AB, S-402 24 Göteborg
e-post: lange@ultrac.se



Abstract

This paper reviews the acoustic conditions in water distribution pipes, comparing a typical background noise with the noise that can be registered when a leak is present. Five different acoustic characteristics are discussed, namely the resonance frequency of the pipe system, the turbulent pressure variations that are caused by a leak, the wide band noise generated by the water spouting out through the leak, the attenuation of sound waves propagating through the water in the pipe and the loss of acoustic signals through a plastic pipe wall. These characteristics are to a great extent independent of each other.

Using the acoustic information, it will be possible to design leak localizing devices that use only one single access point and which can be deployed for all types of pipe material, including plastic pipes and pipes of larger diameters. Monitoring can normally be carried out under normal system pressure, thereby avoiding the introduction of impurities into detached sections.

Key words – water distribution pipes, pipe acoustics, leak acoustics, leak monitoring, leak localizing, leak noise, pipe resonance, turbulence, noise attenuation, sound losses

Sammanfattning

Artikeln ger en översikt över de viktigaste akustiska egenskaperna hos distributionsledningar för vatten och jämför typiska bakgrundsljud med ljud som genereras av läckor. Den behandlar fem olika akustiska faktorer som påverkar läcksökning, nämligen rörets resonansfrekvens, de turbulenta tryckvariationer som en läcka genererar, det bredbandiga brus som uppstår när vatten sprutar ut under tryck, läckljudets dämpning under fortplantningen längs röret samt ljudförlusterna genom rörväggen. Dessa faktorer är i stor utsträckning inbördes oberoende.

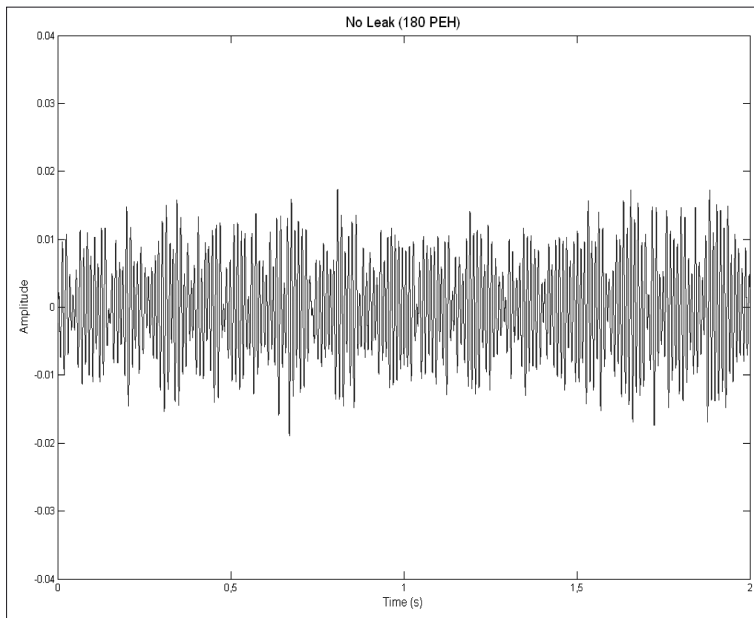
Med kunskap om ledningars ljudförhållanden är det möjligt att konstruera läcksökningsapparatur som bara behöver anslutas i en punkt och som fungerar för alla ledningsmaterial, även plastledningar och ledningar med stor diameter. Kontroll kan ske under fullt tryck, vilket hindrar smuts från att tränga in i systemet.

Inledning

Alla distributionssystem för vatten läcker. Det är nästan oundvikligt med tanke på rörnätets längd och på det faktum att de är förlagda under mark, i en omgivning som ständigt rör sig under inverkan av temperatur och väderlek.

Det är inte mer än 10 % av alla läckor som avslöjar sig genom att bryta upp till ytan. Att hitta dem kräver inga hjälpmedel. Men de övriga 90 % måste sökas med någon form av utrustning. Många olika sådana utrustningar har presenterats under åren, och praktiskt taget alla an-

vänder sig av det ljud som genereras av vatten som sprutar ut ur läckan. Det började med den enkla lyssningsstaven som pressades mot ledningen och vars andra ända trycktes mot trumhinnan. Sedan har elektroniken långsamt kommit till användning, först för att förstärka svaga signaler men så småningom i form av mera avancerade system såsom korrelatorer. Dessa är uppbyggda med ljudsensorer som placeras på vardera sidan om en misstänkt läcka; de båda mottagna läckljudssignalerna jämförs och om ljudhastigheten är känd, resulterar jämförelsen i en förhållandevis noggrann indikering av avståndet till läckan.



Figur 1. Bakgrunds ljud i ett plaströr.

Men det finns fortfarande behov av att utveckla bättre utrustning. Ett grundligt program för utvärdering har genomförts i Canada (Hunaidi et al, 2000), där möjligheter och begränsningar redovisas. Slutsatsen är att dagens metoder inte kan användas generellt vid plastledningar eller vid huvudledningar med stora diametrar. En förutsättning för att lyckas med detta är att känna till läckors och vattenfyllda rörs ljudegenskaper. Ljud som genereras av läckor har studerats av åtskilliga forskare (Hunaidi & Chu, 1999; Long et al, 2003; Muggleton et al, 2002).

Denna artikel avser att redogöra för hur olika parametrar påverkar ljudförhållandena i vattenledningar. Sådana parametrar är:

- rörledningars fysikaliska egenskaper (materialberoende)
- turbulens som genereras av läckan
- det bredbandiga brus som genereras av läckan
- dämpningen av ljudvågor när de fortplantas längs vattnet i röret
- ljudförluster genom rörväggen

Rörledningen

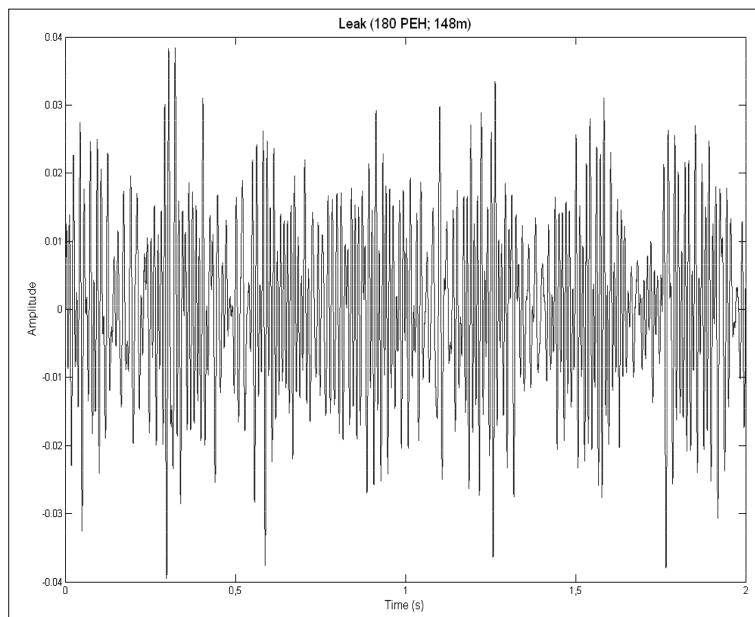
Ett rör för dricksvattentransport kan leda ljud långa sträckor genom att ljudet hålls innanför rörväggen. Emellertid fortplantas inte alla frekvenser lika väl, utan en speciell frekvens favoriseras, nämligen rörets resonansfrekvens. Man kan dra en liknelse med ett musikinstrument, med den inskränkningen att röret är ett mycket dåligt instrument eftersom det bara kan spela en

enda ton: eftersom röret är nedgrävt finns det ingen tillgänglig punkt att pressa mot för att ändra resonansfrekvensen. Röret kan exciteras på olika sätt, av en läcka, av trafik, av maskiner i närheten, men detta påverkar bara tonens styrka och inte dess frekvens.

Rörets resonansfrekvens beror av dess mekaniska egenskaper och dimensioner såsom längd, diameter, väggmaterial och tjocklek. Vattentrycket har ganska liten inverkan. Temperaturen kan teoretiskt ha stort inflytande, men temperaturen hos en nedgrävd ledning brukar inte variera mycket. På det hela taget kan man säga att det inte går att beräkna resonansfrekvensen med någon precision, eftersom vi inte har exakt kunskap om de karakteristiska parametrarna som dessutom påverkas av befintliga servisledningar, dimensionsändringar, krökar och annat.

En läcka är en kraftfull källa till excitering, eftersom den snabbt reducerar trycket från fullt systemtryck till noll och, för att fortsätta med analogin, är ekvivalent med att instrumentet spelas med full kraft. Men även om det inte finns någon läcka är röret aldrig helt tyst därför att friktion, böjar och dimensionsändringar alla ger upphov till ett icke laminärt flöde, virvlar, i röret. Därför skapas i praktiken en viss turbulens som exciterar energi. Likaså ger ofta yttre källor som pumpar, trafik eller maskinerier upphov till excitering

Som ett exempel på detta visas i Fig. 1 en inspelning av ett typiskt bakgrunds ljud i ett PEH 160-rör. Lägg märke till den totalt dominerande och nästan konstanta frekvensen – rörets resonansfrekvens.



Figur 2. Läckgenererat ljud i ett plaströr.

Jämför nu med Fig. 2 som är inspelad på samma rör men nu med en läcka på ca 60 liter per minut. Det är tydligt att frekvensen är densamma, men 1) ljudamplituden har ökat betydligt, och 2) amplitudvariationerna blir mycket större när en läcka förekommer. Detta är viktiga resultat som kommer att diskuteras mera detaljerat härafter.

Rörets resonans bestäms, som ovan sagts, i huvudsak av mekaniska parametrar, som i allmänhet är konstanta vid varje enskilt fall men okända. På grund härav kan i praktiken ett studium av resonansfrekvensen och dess amplitud bara ge slutsatsen att en läcka existerar, men studien kan inte med någon större noggrannhet användas för att bestämma avståndet till läckan. Amplitudvariationerna kan dock användas för att ge en grov uppskattning av läget.

Läckors turbulens

En läcka ger vanligtvis inte ett konstant flöde utan pulserar. Den ständigt varierande turbulensen skapar tryckvariationer. När trycket då varierar, påverkar detta i sin tur resonansens amplitud – ju högre tryckstöt, ju kraftigare resonans. Fig. 2 visar tydligt hur ljudets amplitud styrs av tryckvariationerna. Det har sedan länge varit känt att dessa variationer kan uppfattas av den mänskliga hörseln och de utnyttjades redan av det mest grundläggande instrumentet, lyssningsstaven. Det skulle i princip gå att uppfatta signalerna från läckans turbulens var som

helst längs röret, men i verkligheten finns det naturligtvis bara några enstaka punkter där man kan komma åt.

Om vi går ett steg längre och låter turbulenssignalerna undergå elektronisk och matematisk signalbehandling, kan de elektriska signaler som sensorerna plockar upp transformeras till vilket frekvensområde som helst. Detta är en teknik som är särskilt viktig när det är fråga om plaströr eller rör med stor diameter där alla de frekvenser som beskrivits här ovan är så låga att den mänskliga hörseln inte förmår uppfatta dem. Om de behandlas elektroniskt på ett sådant sätt att hela frekvensområdet höjs till att falla inom örats normala känslighetsområde blir de både hörbara och möjliga att visa på en display, en teknik som är oundgängligen nödvändig för den expert vars uppgift det är att bedöma huruvida en läcka förekommer eller ej.

Läckors bredbandiga brus

Vid läckstället genereras inte bara turbulenta tryckvariationer, utan också ljud med ett brett frekvensspektrum. Detta är samma, fräsande spektrum som var och en har observerat när han öppnat en vattenkran i hemmet. Man kan beteckna detta ljud som ett »vitt brus«, en term som är analog med förhållandena inom optiken, där som bekant det vita ljuset innehåller alla färger (eller frekvenser) som ju kan separeras i en regnbåge. Begreppet »vitt brus« betyder alltså att det innehåller alla – eller nästan alla – frekvenser. Ett annat exempel på ett nästan vitt brus är

det väsende ljud som uppstår i en TV-mottagare vid »myrornas krig», dvs. den är inställd så att den inte tar emot någon sändare.

Definitionsmässigt innehåller alltså det vita bruset alla frekvenser inom det behandlade frekvensbandet. Det kan fortplantas genom vattnet i en rörledning och tas emot av en sensor som förmodligen placerats på ett visst avstånd, där den har kunnat appliceras. I praktiken kommer detta brus att maskeras av rörets resonansfrekvens, som i regel innehåller mycket högre akustisk energi än det vita bruset. Med hjälp av lämplig filtrering kan emellertid det vita bruset skiljas ut.

Alla komponenterna i det vita bruset förekommer inte exakt samtidigt utan de genereras slumpmässigt. Över en längre tid kan de samtliga emellertid betraktas som existerande inom ett och samma tidsintervall. Det vita brusets komponenter undergår dämpning när de fortplantas från källan (läckan) till sensorn (i regel en accelerometer eller en hydrofon).

Ljudets dämpning under fortplantningen från läckan till detekteringspunkten

Som redan tidigare sagts spelar det mindre roll vid vilken punkt rörets resonans exciteras. Om vi återigen ser på analogin med en fiolsträng, kommer dess tonhöjd inte att ändras om stråken sätts an på olika positioner, utan beror bara på strängens längd och dimensioner (fingerplacering). Å andra sidan får det vita ljud som produceras av en läcka andra egenskaper, eftersom ljudet utsätts för dämpning när det fortplantas från läckstället till det ställe där sensorn (hydrofönen) är placerad.

Dämpningen påverkas huvudsakligen av två fenomen – frekvensen och avståndet, även om också temperatur och tryck har viss inverkan. Liksom vid alla andra parametrar i naturen dämpas höga frekvenser mera med avståndet än de låga (tänk exempelvis på ett fjärran åskväder). Dessa fenomen kan användas omvänt för att bestämma avståndet till läckan. Ett mera avlägset läckljud kommer alltså att ha ett annat frekvensspektrum än ett närbeläget, där det förra har en lägre proportion högfrekventa ljud, eftersom dessa har dämpats mera. Det är en intressant tanke att utnyttja denna egenskap genom att med elektronisk signalbehandling bestämma förhållandet mellan låga och höga frekvenser hos det uppfattade läckljudet. Metoden är användbar men lider av den svagheten att om distansen mellan läcka och sensor är kort, blir avståndsdämpningen så liten att noggrannheten i förhållandet också blir liten. Fördelarna skulle vara:

- Det behövs bara en hydrofonanslutning
- Inga radiosändare behövs
- Tidsvinsten jämfört med traditionell zonmätning är stor
- Eftersom inga ventiler i systemet behöver stängas kan alla mätningar ske med normal trycksättning, varför orenheter inte kan tränga in i distributionsnätet.

De speciella svårigheterna vid plastledningar

Plast är ett mjukare material än stål. Detta medför ett antal problem när det gäller att uppfatta och tolka läckljud som har fortplantats från ett läckställe till det ställe där sensorn befinner sig. Bland de fysikaliska fenomenen till vilka hänsyn måste tas finns:

- Ljudet dämpas kraftigt, särskilt det hörbara ljudet
- Ljudets hastighet är låg
- rörledningarnas resonansfrekvens är vanligtvis mycket låg
- den akustiska impedansen är låg, vilket medför att ljudvågor kan passera ut från vattnet genom rörväggen utan att reflekteras
- magneter kan inte användas för att ansluta accelerometrar

Huvuddelen av de problem som är förknippade med läcksökning i plastledningar beror på att läckljuden dämpas kraftigare än i ställedningar och på att dämpningen är mera uttalad ju högre frekvensen är. Den höga dämpningen betyder att det ofta inte går att använda traditionell korrelationsteknik, eftersom denna bygger på att samma brusmönster kan uppfattas i två punkter på var sin sida om läckan. Men i plastledningar kan dämpningen ofta vara så hög att läckbruset har försvunnit helt vid den ena sensorns placering (eller i bägge).

Vid större avstånd är de enda urskiljbara frekvenserna så låga, att den mänskliga hörseln inte längre förmår uppfatta dem. Och för att göra situationen ändå besvärligare, ligger dessa kvarvarande frekvenser inom samma område som rörets resonansfrekvens, som genom sin dominans kommer att maskera dem. Trots allt kan, som Ultrac har visat, avancerad elektronisk signalbehandling vara till en hel del hjälp. En allmän transformation uppåt (pitch-up) till ett område där de faller innanför det mänskliga örats känslighetsområde har gjort det möjligt att upptäcka läckor i plaströr på upp till 300 meters avstånd.

När det gäller att bedöma avståndet till en läcka går det som ovan sagts att ta hjälp av skillnaderna i dämpning vid olika frekvenser hos signaler som fortplantat sig längs vattnet i en rörledning. Höga frekvenser dämpas mera med avståndet än vad låga frekvenser gör. Följakt-

ligen kan man dra vissa slutsatser om avståndet mellan läcka och sensor genom att observera förhållandet mellan höga och låga frekvenser. Detta är emellertid inte det enda fysikaliska fenomen till vilket hänsyn måste tas. Läckor kan ha olika spektra och en mycket komplicerad signalanalys krävs, som tar hänsyn till de fysikaliska egenskaperna hos det övervakade röret.

Ljutförluster genom rörväggen

Utöver de ljutförluster som uppstår när ljud fortplantas genom vatten finns det andra orsaker till att ljudenergi går förlorad. Det är ofrånkomligt att en del akustisk energi går förlorad genom att ljudet passerar igenom rörväggen. Den proportion av ljud som försvinner på detta sätt bestäms av förhållandet mellan den så kallade akustiska impedansen hos rörväggens material jämfört med vattnets. Plastmaterial har ungefär samma akustiska impedans som vatten, vilket betyder att rörväggen inte utgör något hinder för infallande ljud utan låter en stor del av ljudet passera igenom i stället för att reflekteras tillbaka in i röret. Stål har däremot en mycket högre akustisk impedans än vatten och reflekterar därför nästan allt infallande ljud, vilket betyder att förlusterna på grund av utpasserande akustiska signaler blir små. Vid plaströr kan också den omgivande markens beskaffenhet spela roll. Om fyllmaterialet runt röret gör god kontakt med rörets utsida, kan ljudet fortsätta utåt och försvinna genom att det absorberas av fyllmaterialet, medan om den omgivande substansen är luft med sin ytterst låga akustiska impedans kommer ljudenergin att reflekteras vid rörets utvändiga yta och kan studsas tillbaka in i röret.

Denna typ av ljutförluster utgör en av viktigaste begränsningarna när det gäller att lokalisera läckor i plaströr med akustiska metoder. Mycket avancerad elektronisk signalbehandling krävs för att minska problemet genom att hantera och förstärka den obetydliga återstoden av akustiska signaler som härrör från läckan.

Andra akustiska fenomen

Det är inte bara vid plastledningar som läcksökningsexperten råkar i svårigheter. Precis samma slags svårigheter möter vid ledningar med stora diametrar, av stål, betong

eller andra material. De fysikaliska lagarna medför att sådana grova ledningar också uppvisar mycket låga resonansfrekvenser, och följaktligen blir dämpningsegenskaperna likartade som vid plastledningar. Även här måste lösningen bli en frekvenstransponering (pitch-up).

Det finns ytterligare ett användningsområde, där pitch-up ger stora förbättringar. Det gäller nedgrävda ledningar av plast, där man är osäker på hur de är förlagda. Den vanliga metoden är att generera tryckslag i ledningen, varefter det pulsade ljud som därvid uppstår följs längs ledningen med hjälp av en markmikrofon. Här uppstår samma dämpningsproblem som vid läcksökning, men med hjälp av pitch-up-principen kan den distans där det är praktiskt möjligt att följa ledningen ökas från annars 10–20 meter upp till åtskilliga hundra meter.

Slutsatser

Läckor i vattenledningsnät kan oftast grovt konstateras genom att den löpande kontrollen av förbrukningen i distributionsnätet visar onormalt höga värden under nattens stilla timmar. Men om man vill ta reda på var läckan finns för att kunna reparera den, krävs dessutom någon form av mätningar ute på nätet. Sådana mätningar baseras nästan alltid på de ljud som läckan genererar. Som denna artikel visar, är ljudförhållandena i en vattenledning som regel komplicerade, i synnerhet när det gäller plast eller stora diametrar. För att hålla ett distributionsnät i gott skick krävs förståelse för detta och regelbundna kontroller med avlyssning för att skaffa och upprätthålla kompetens. Så sparas miljö, reningskemikalier och elkostnader”.

Referenser

1. Hunaidi O et al (2000) Detecting leaks in plastic pipes, *AWWA Journal* 92 (2) 82–
2. Hunaidi O & Wing Chu (1999) Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes, *Applied Acoustics* 58 (3) 235–254
3. Long R et al (2003) Acoustic wave propagation in buried iron water pipes, *Proc Royal Society A* 459
4. Muggleton J M et al (2002) Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection, *J Sound and Vibration* 249 (5) 939–954

