

SANNING OCH KONSEKVENNS FÖR SVENSKA VATTENLEDNINGAR

TRUTH AND DARE FOR SWEDISH WATER PIPES



Johanna Lykke Sørensen¹*, Erik Nilsson¹, Martin Bjarke¹, Tommy Giertz², Didrik Nilsson³

¹ Teknisk vattenresurslära, LTH, Lund

² Stockholm Vatten och Avfall, Stockholm

³ Vatten och Avloppskompetens i Norr, VAKIN, Umeå

* corresponding author, jobanna.sorensen@tvrl.lth.se

Sammanfattning

Detta arbete kick-startar AI (artificiell intelligens) för ledningsunderhåll i VA-branschen i Sverige. Arbetet med befintliga VA-nät är idag främst reaktivt; man reparerar läckor varefter man blir varse dem, ibland till stora kostnader om läckan är omfattande och akut. Med denna artikel vill vi sätta fokus på proaktivt arbete med ledningsnät och diskutera riskanalys inom området. En ANN-modell som tidigare tagits fram används för att uppskatta sannolikhet för läckage på vattenledningar. Modellen har tränats på läckor som inträffat under en tioårsperiod, och en jämförelse med läckor som rapporterats efter den studerade perioden visar att ANN-modellen lyckas identifiera grupper av ledningar som oftare får läckage. Genom att kombinera ANN-modellen med en modell för konsekvensbedömning kan de mest prioriterade ledningarna ur ett riskperspektiv vaskas fram. Medan flera VA-organisationer deltagit i projektet Ordning i RörANN, presenteras här endast beräkningar baserade på Stockholm Vatten och Avfalls data.

Abstract

This work kick-starts AI (artificial intelligence) for pipe management among Swedish water utilities. The current work with pipe management is mainly reactive; leaks are repaired after they are detected, sometimes with large costs if the leakage is extensive and critical. With this article, we want to focus on proactive pipe network management and discuss risk analysis in the field. A previously developed ANN model is used to estimate probability of leakage in water pipes. The model has been trained on leaks that have occurred over a ten-year period, and a comparison with leaks reported after the studied period shows that the ANN model succeeds in identifying groups of pipes with a higher leakage frequency. By combining the ANN model with a model for impact assessment, the most prioritised pipes, from a risk perspective, can be identified. While several water utilities have participated in the project Ordning i RörANN, only results based on data from Stockholm are presented here.

Key words: drinking water distribution, pipe refurbishment, pipe renewal, risk analysis, consequence analysis

Bakgrund

I Sverige går 15–20 % av dricksvattnet till spillo genom läckage. Läckaget belastar både miljö och ekonomi, men är i hög grad också relaterat till samhälls- och hälsa. Arbetet med befintliga VA-nät är idag främst reaktivt; man reparerar läckor varefter man blir varse dem, ibland till stora kostnader om läckan är omfattande och akut. Förnyelseplaneringen, eller snarare planering av reinvestering, styrs till stor del av externa faktorer, t.ex. att gatukontoret planerar omläggning av en gata. Med denna artikel vill vi sätta fokus på proaktiv förnyelseplanering av dricksvattenledningar och presentera dels en modell för att peka ut ledningar med risk att läcka, dels olika sätt att bedöma vilken konsekvens en läcka på en viss ledning skulle kunna få.

Stockholm Vatten och Avfall (SVOA) har utvecklat en modell som utifrån data om inrapporterade läckor ger information om vilka ledningar som är mest benägna att läcka (Rehn & Giertz, 2019). Modellen analyserar data genom ett artificiellt, neuralt nätverk (ANN) och nyttjar data om själva ledningen som nätägaren redan har samlat in (material, anläggningsår, trycknivåer, etc.) eller attribut i omgivningen som finns tillgängligt hos andra dataägare (jordart, trafikklaster, demografi, etc.). Modellen beräknar ett så kallat prediktionsvärde för läckage i varje ledning genom att leta samband mellan attributen och förekomsten av registrerade läckor.

Resultatet från modellen kan ge VA-förvaltningarna ett verktyg till smartare beslutsstöd, särskilt om prediktionsvärdet kan användas för att uppskatta en sannolikhet för framtida läckage och kombineras med en konsekvensuppskattning för en mer komplett riskbedömning. Givet den pågående digitalisering och ökade krav på proaktivt arbete som råder inom VA-branschen, så bedöms behovet av dessa och liknande modelleringsverktyg att öka de kommande åren. Resultat från SVOA:s ANN-modell, och systemmodellen VASS AI som utvecklats parallellt av Svenskt Vatten, används redan i nuläget som prioriteringsverktyg i arbetet med underhålls- och reinvesteringssplanering runt om i Sverige:

- SVOA, där ANN-modellen har utvecklats, har kommit relativt långt i sitt arbete med proaktivt ledningsunderhåll. Modellen används i det dagliga läcksökningsarbetet samt i investeringsplaneringen. Dessutom håller SVOA på att utveckla sin modell för konsekvensbedömning.
- I Umeå avses ANN-modellen användas till förebyggande underhåll och som underlag till förnyelseplanering. Vindeln, vars ledningar sköts av VAKIN (Vatten- och avloppskompetens i norr) liksom i Umeå, har inte tillräckligt med tidigare läckor och för låg datakvalitet för att kunna träna ANN-modellen på det egna nätet. Därför tränas modellen i stället på data från Umeå och appliceras sedan på Vindelns ledningar.
- VA SYD har testat flera digitala verktyg parallellt och använder i nuläget ANN-modellen som underlag för att planera arbetet för sitt läcksökningsteam och som en del i att identifiera vilka ledningssträckor som är intressanta att undersöka vidare i förnyelsearbetet.
- Modellen har även körts på data från Göteborg Kretslopp och Vatten.
- Miljö- och Vatten i Örnsköldsvik AB (MIVA) planerar att köra modellen inom närmaste åren. De har deltagit som piloter i utvecklingen av VASS AI, där en webbaserad modell har tagits fram där VA-bolag kan ladda upp sina data och erhålla sannolikheter för läckor i sina nät.
- Även MittSverige Vatten & Avfall (MSVA) har testat VASS AI-modellen och de ser ett stort behov av denna typ av arbetssätt. Därför följer de utvecklingen och arbetar med sina data för att kunna använda denna typ av modell skarpt i en nära framtid.

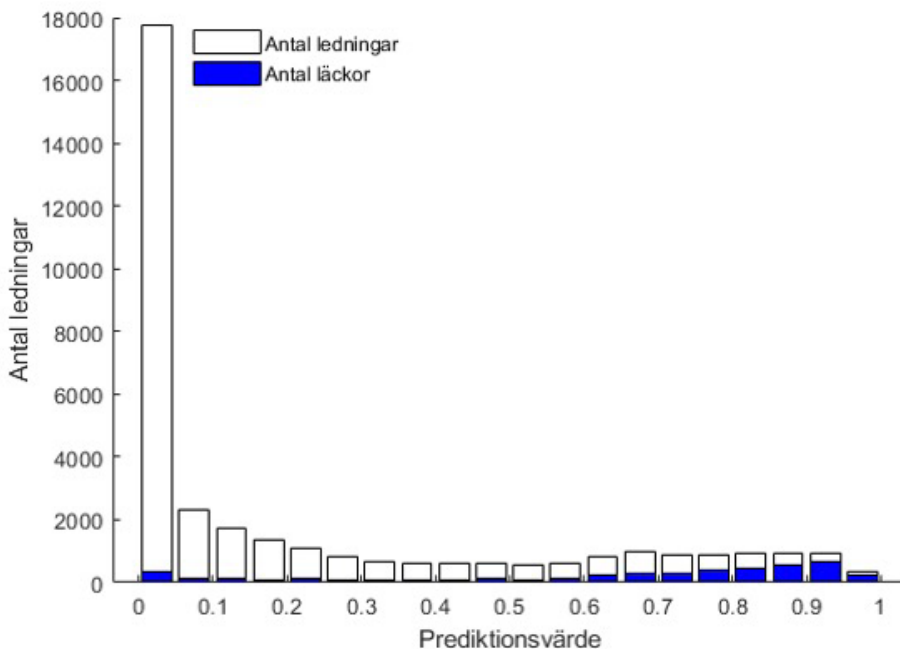
Forskningsprojektet Ordning i RörANN initierades 2019 för att utvärdera ANN-modellen och i samverkan med VA-organisationer ta fram metoder för hur resultaten kan komma till praktisk användning i underhålls- och förnyelseplanering.

ANN-modellen har i projektet utvärderats på data från Göteborg Kretslopp och Vatten, VAKIN, VASYD och SVOA. Även MIVA, MSVA, Uppsala Vatten, NSVA och Ängelholms kommun har följt projektet. Eftersom resultaten snart ska publiceras i internationella vetenskapliga tidskrifter, som inte accepterar artiklar med tidigare publicerat material, så presenterar vi i denna artikel enbart resultat från SVOA. Vi vill redan nu understryka att denna studie inte hade varit möjlig utan bidrag från ovan nämnda nätägare, Sweden Water Research, och övriga deltagare i Ordning i RörANN. Även Svenskt Vatten har bidragit med kunskap och erfarenhet. De som är intresserade av resultatet från de andra ledningsägarna kan kontakta författarna, så skickar vi en kopia av de vetenskapliga artiklarna så snart de är publicerade.

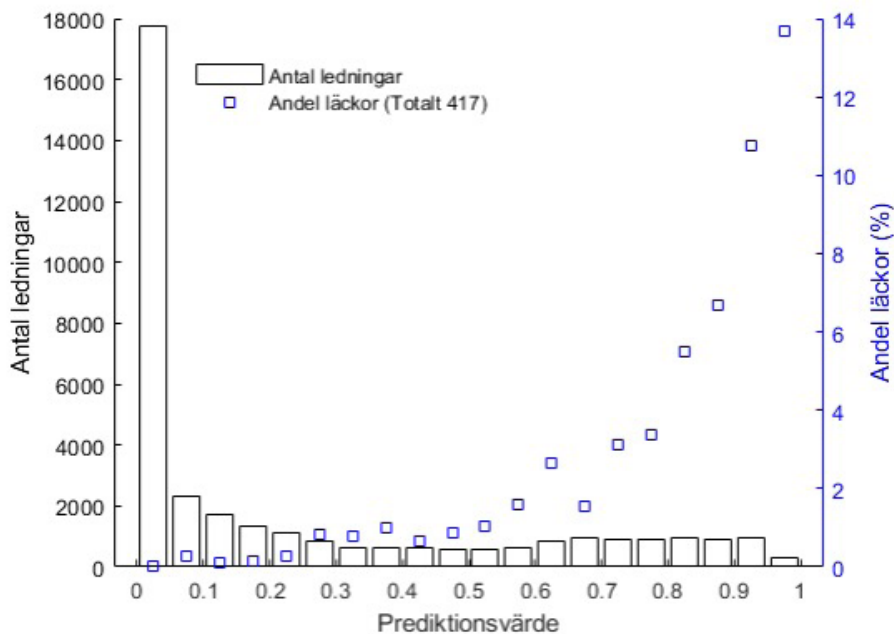
Beskrivning och utvärdering av ANN-modellen

SVOA:s ANN-modell bygger på ett tjugotal attribut såsom material, dimension, jordtyp och

tryckzon (Rehn & Giertz, 2019). Genom att mata modellen med denna information kan modellen identifiera vilka kombinationer av attribut som kan kopplas till tidigare registrerade läckor under en specifik period (i fallet med SVOA:s data 2010–2019). Modellen kan sedan beräkna hur väl attributen för respektive ledning överensstämmer med attributen kopplade till dessa läckor och ge ett siffervärde (0–1) för detta, ett så kallat prediktionsvärde, för alla ledningar såsom dessa definieras i ledningsägarens databas. De ledningar vars attribut liknar attributen hos ledningar med tidigare läckor får upp mot 1 i prediktionsvärde och de som är väldigt olika får ner mot 0. Figur 1 visar fördelningen av prediktionsvärde samt förekomst av tidigare läckor för SVOA:s ca 35 500 vattenledningar. De flesta ledningar i SVOA:s ledningsnät får ett mycket lågt prediktionsvärde, 70% ligger under 0,25, varefter fördelningen är någorlunda jämn. Detta visar att det är en liten andel av ledningarna vars attribut liknar de attribut som associeras till



Figur 1. Antal ledningar i varje grupp av prediktionsvärde för SVOA:s data. I blått visas antalet ledningar med registrerade läckor, vilket används som indata för att träna ANN-modellen. 26,5 % av alla läckor ses på ledningar som har ett prediktionsvärde under 0,5.



Figur 2. Antal ledningar i varje grupp av prediktionsvärde för SVOA (som staplar, vänstra axeln) och andel läckor inom varje grupp (%) som uppstått efter att ANN-modellen körts (som punkter i blått, högra axeln). Sammanlagt så har 417 läckor uppstått under utvärderingsperioden januari 2019 till maj 2021.

registrerade läckor, och därmed ges höga prediktionsvärden. Vid en jämförelse med ledningar där läckor registrerats (markerade med blått) så går det att se att dessa generellt ges höga prediktionsvärden ($\geq 0,6$), vilket indikerar att modellen lyckas identifiera ett samband mellan attributen för dessa ledningar och läckage. 27% av ledningarna med registrerade läckor ges låga prediktionsvärden ($< 0,5$), vilket beror på att modellen inte har identifierat några systematiska samband mellan dessas attribut och registrerade läckor. Det innebär att läckorna hos de ledningarna har skett under ovanliga omständigheter, som avviker från den stora mängden av tidigare registrerade läckor. Det kan också bero på att något förklarande attribut saknas i databasen.

Efter körning av ANN-modellen för respektive nätägare så har rapporter om nya ledningar med läckage samlats in. I SVOA:s fall tränades ANN-modellen på data från 2010–2019. Därefter har 417 nya rapporter om läckor inkommit under utvärderingsperioden januari 2019 till maj 2021.

I figur 2 redovisas resultaten från ANN-modellen (samma som i figur 1) tillsammans med andelen ledningar med registrerade nya läckor i respektive prediktionsintervall. Resultaten visar ett tydligt samband mellan prediktionsvärde baserat på historiska data (2010–2019) och andelen ledningar där nya läckor uppstått (2019–2021). Högre prediktionsvärde indikerar alltså högre andelen ledningar med läckage. För prediktionsvärdena 0,9–1,0 ($\approx 1\ 300$ ledningar) är andelen ledningar med läckor i utvärderingsperioden ungefär 12%, vilket kan jämföras med prediktionsvärdena 0,0–0,2 ($\approx 23\ 100$ ledningar) där andelen är omkring 0–0,1%. Detta verifierar att modellen fungerar: dvs att man kan använda historiska data för att förutsäga vilka ledningar som har en högre sannolikhet att läcka, åtminstone några år framåt i tiden.

Hur bra är då ANN-modellen? För att svara på det skulle man behöva göra läcksökning av ett stort antal ledningar med t.ex. prediktionsvärde över 0,9, vilket inte har varit möjligt i detta projekt. I figur 2 ses att andelen läckor är mycket högre för

höga prediktionsvärde. Detta kan också visas som i figur 3, där procentandel av ledningar och läckor visas för varje prediktionsgrupp. Det ses alltså att för de höga prediktionsgrupperna (0,6–0,7 och över) är det en större procentandel läckor än procentandel ledningar i gruppen. I gruppen med högst prediktionsvärden (0,9–1,0) finns 35 % av läckorna men bara 3,6 % av ledningarna. Över 75 % av läckorna rapporterades från ledningar som har prediktionsvärde 0,7 eller högre. Totalt finns det 5 000 ledningar i dessa grupper, vilket är 14 % av SVOA:s 35 500 ledningar.

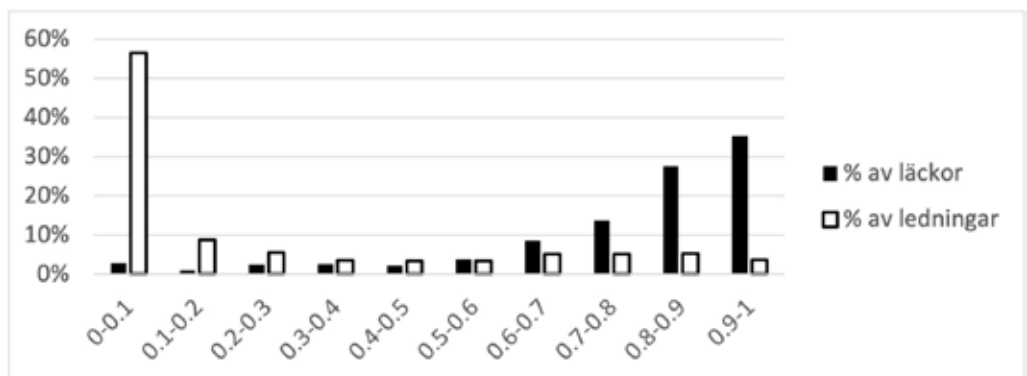
För att bedöma hur prediktionsvärde kan användas för att uppskatta läckagefrekvensen i olika delar av ledningsnätet genomfördes en analys för att se hur ofta ledningar med olika prediktionsvärden får läckor över en längre period. Figur 4 visar dessa resultat för olika 5- och 10-årsperioder för 2010–2019. Olika perioder har inkluderats för att utvärdera huruvida förhållandena mellan prediktionsvärden och läckagefrekvens varierar mellan perioder, samt för att identifiera hur långa perioder som behövs för att erhålla pålitliga resultat. Sambanden presenteras både per ledning och ledningslängd för att visa hur resultaten kan användas för att uppskatta antalet läckor över en period antingen baserat på antal ledningar eller ledningslängd.

Precis som för de nya läckorna i figur 2 ses här ett tydligt samband mellan högre prediktionsvärden och läckagefrekvens, både per ledning och

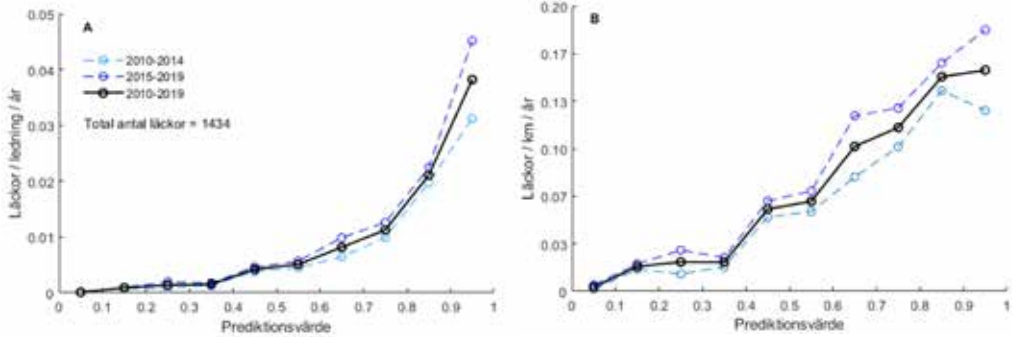
per ledningslängd. Detta visar att modellen lyckas med att identifiera kombinationer av attribut som kan associeras till läckor. En jämförelse med de genomsnittliga läckagefrekvenserna (0,004 läckor/ledning/år och 0,067 läckor/km/år) visar också att läckagefrekvenserna för höga prediktionsvärden ($\geq 0,8$) ligger ungefär 7–10 gånger högre än genomsnittet per ledning och 2–3 gånger högre per ledningslängd.

Att läckagefrekvenserna för prediktionsvärden varierar mellan olika perioder, samt i vissa fall är konstant eller minskar med ökande prediktionsvärden, beror på att det i ANN-modellen saknas några faktorer som bidrar till läckor. Dessa faktorer är okända. På grund av osäkerheten behövs en viss mängd läckor för att kunna identifiera tillförlitliga läckagefrekvenser för prediktionsvärdena. Förhållandet mellan prediktionsvärde och läckagefrekvens per ledning är mer konsekvent än förhållandet per ledningslängd. Detta beror främst på att modellen är tränad på attribut på just ledningsnivå. Längre ledningar har generellt högre prediktionsvärden än korta ledningar. Det beror på att under liknande förhållanden så har en längre ledning en högre läckagefrekvens än kortare ledningar. Detta kan vara en bidragande orsak till att läckagefrekvensen per ledningslängd inte ökar med ökande prediktionsvärden för vissa perioder.

Baserat på resultaten för SVOA:s data bör därmed minst 10-årsperioder av registrerade läckor



Figur 3. Procentandel ledningar i varje grupp av prediktionsvärde för SVOA (vita staplar) och procentandel läckor inom varje grupp (svarta staplar) som uppstått efter att ANN-modellen körts.



Figur 4. Årlig läckagefrekvens per ledning (A) och ledningslängd (B) baserat på samtliga läckor för 2010–2019 för SVOA. Totalt har 1434 läckor registrerats, vilket ger en genomsnittlig läckagefrekvens på 0,004 läckor / ledning / år (A) och 0,067 läckor / km / år (B).

användas för att identifiera läckagefrekvens per ledningslängd, medan det ser ut att vara tillräckligt med 5-årsperioder för att identifiera ett pålitligt förhållande mellan prediktionsvärde och läckagefrekvens per ledning.

Gruppvis prioritering baserat på prediktionsvärde

Den tydliga skillnaden i läckagefrekvens mellan prediktionsvärden gör det möjligt att uppskatta sannolikheter för läckage samt läckagefrekvenser för ledningar i ett ledningsnät. Att få en uppfattning om förväntat antal läckage framöver kan vara användbart i resursplaneringen för läcksökning och underhåll. Det kan även användas som underlag för prioriteringar avseende undersökningar och underhållsarbete, antingen för sig eller i kombination med uppskattning av konsekvensen av ett läckage (mer om detta nedan).

Som ett teoretiskt exempel kan ledningar delas in i grupper med olika antal ledningar och på så vis kan sambandet mellan sannolikheten för att få minst en läcka per år och prediktionsvärden studeras (tabell 1). Dessa sannolikheter är beräknade utifrån de årliga läckagefrekvenserna (figur 4a), baserat på ett antagande att den årliga sannolikheten för läckage för en ledning i ett prediktionsintervall gäller för hela gruppen. Det antas även att sannolikheten för läcka på en ledning är oberoende av andra läckor som sker under perioden. Kraven för en poissonfördelning bedöms vara uppfyllda. Exempelvis har en ledning i prediktionsintervallet

0,9–1,0 en årlig sannolikhet för läcka på 3,8 % (figur 4a). Då kan sannolikheten att det sker minst en läcka bland fem ledningar i det prediktionsintervallet under ett år beräknas till $(1 - (1 - 0,038)^5) = 17,6\%$.

Tabell 2 visar i sin tur hur läckagefrekvenser för grupper med olika ledningslängder varierar med prediktionsvärde. Baserat på sådana sammanställningar kan grupper av ledningar med särskilt höga och låga sannolikheter för läckage eller läckagefrekvenser identifieras. Genom att analysera sannolikheter och läckagefrekvenser för olika kombinationer av ledningsgrupper kan ledningsförvaltaren få en uppfattning om frekvenser inom hela och delar av ledningsnätet.

Tabell 1. Sannolikhet för minst en läcka per år baserat på en hypotetisk grupp av ledningar. Beräkningarna baseras på samma resultat som i figur 4a. Sannolikheten för minst 1 läcka per år för en grupp är beräknad som: $pn = (1 - (1-p)^n)$, där p är den årliga sannolikheten för läcka för en enskild ledning i ett visst prediktionsintervall och n är antal ledningar i gruppen.

Antal ledningar	Sannolikhet för minst 1 läcka per år (%)			
	Genomsnittlig	P= 0,7–0,8	P= 0,8–0,9	P= 0,9–1,0
1	0,4	1,1	2,1	3,8
10	3,9	10,5	19,1	32,1
50	18,2	42,5	65,4	85,6

Tabell 2. Beräknad läckagefrekvens baserat på en hypotetisk grupp av ledningar med olika total ledningslängd, dels som ett genomsnitt för hela ledningsnätet, dels för grupper av ledningar med höga prediktionsvärden. Beräkningarna baseras på samma resultat som i figur 4b.

Ledningslängd (km)	Årlig läckagefrekvens (läckor/km/år)			
	Genomsnittlig	P=	P=	P=
		0,7–0,8	0,8–0,9	0,9–1,0
1	0,07	0,11	0,14	0,15
10	0,67	1,10	1,40	1,50
20	1,34	2,20	2,80	3,00

Vilka data behöver samlas in för att kunna köra ANN-modellen?

Det är en tidskrävande uppgift att samla in och kvalitetssäkra stora mängder data. Det är därför intressant att veta vilka attribut som är viktigast för att ge användbara resultat. Eftersom ANN-modellen i sig inte ger någon indikation av vilka attribut som är viktiga, så måste andra algoritmer användas. För att undersöka attributen i SVOA:s data har två sådana algoritmer körts: ReliefF och histogrambaserad Gradient boosting classification tree (GBT) kopplad med Permutation importances (PI) (se Nilsson (2020) för närmare beskrivning av ReliefF samt en generell diskussion om attribut). Dessa

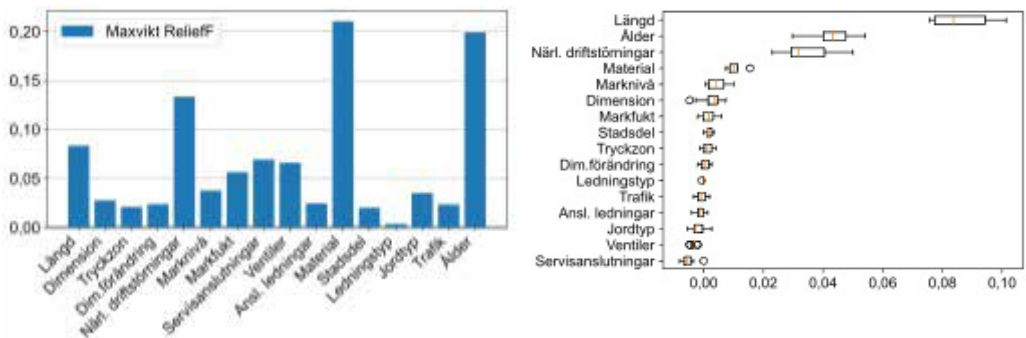
algoritmer involverar alltså inte ANN-modellen utan är en utvärdering av attributens viktighet i förhållande till läckor som görs innan ANN-modellen körs.

I figur 5 visas resultatet av de två algoritmerna. ReliefF indikerar att material, ålder, närliggande driftstörningar och ledningslängd är särskilt viktiga, medan GBT-PI indikerar att ledningslängd, ålder och närliggande driftstörningar är särskilt viktiga. Medan ReliefF värderar material högst, sticker detta attribut inte ut för GBT-PI.

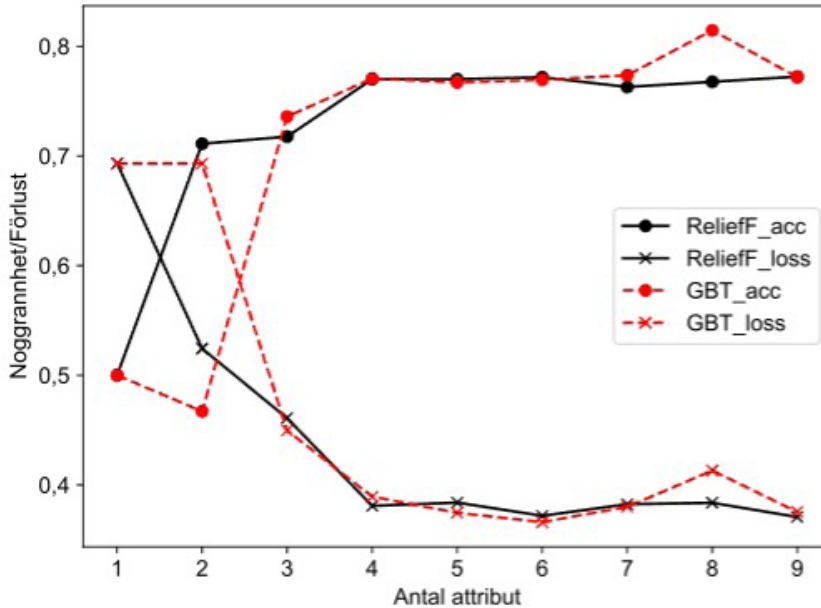
Resultaten från ovanstående algoritmer kan som ett nästa steg utvärderas genom att göra flera körningar med ANN-algoritmen, där attribut läggs till ett i taget i den ordning som de rankas enligt respektive metod. Figur 6 visar hur ANN-modellens förlust och noggrannhet förändras när fler attribut adderas.

Efter fyra attribut förändras varken noggrannhet eller förlust nämnvärt. För både ReliefF och GBT-PI gäller detta de fyra attributen material, ålder, närliggande driftstörningar och ledningslängd. För SVOA indikerar resultatet alltså att det är dessa fyra attribut som främst bör samlas in och kvalitetssäkras. För andra ledningsnät är det möjligt att andra attribut är viktigare, men det är alltså relativt få attribut som behövs för att få användbara resultat med ANN-modellen.

De två algoritmerna som körts för att peka ut viktiga attribut ger ett samstämmigt resultat,



Figur 5. Utvärdering av ledningsattributens vikt för SVOA:s ledningsnät utifrån två olika metoder. Vänster: Maxvikt för attributen utifrån ReliefF. Höger: Attributens vikt utifrån GBT-PI. I båda fallen indikerar högre värde att attributet är av större vikt.



Figur 6. Noggrannhet och förlust för ANN-modellen när fler attribut läggs till i den ordning som ReliefF (svart, heldragen linje) och GBT-PI (röd, streckad linje) indikerar. Noggrannhet (acc), vilket anger hur bra ANN-modellen är på att förutsäga vilka ledningar som har haft läckor, visas som linje med punkter. Förlust (loss), vilket är ett mått på hur långt ifrån yttervärdena noll och ett modellen är i sin klassificering, visas som linje med kryss.

nämligen att material, ålder, närliggande driftstörningar, och ledningslängd behöver inkluderas i ANN-modellen. En svaghet hos de två algoritmerna är dock att de endast kan analysera den data som redan samlats in. Det betyder att om datakvaliteten hos ett attribut är dålig, eller om attributet helt saknas i databasen, kommer detta attribut inte att identifieras som viktigt enligt algoritmerna. Exempelvis tryckzon är ofta dåligt beskrivet i databaserna. För att förbättra detta så bör det finnas individuella namn för varje tryckzon, inte enbart indelningen i hög/låg, eller ännu hellre data som beskriver de egenskaper som är relevanta, eftersom det då blir jämförbart med andra ledningsnät. Det kan till exempel vara genomsnittlig trycknivå och variation i trycknivå. Utan bättre definierade data är det omöjligt att utvärdera huruvida trycknivå och dess variation är viktiga attribut.

Reparationer

För ANN-modellen måste man överväga hur en reparation ska hanteras. Beroende på om ledningen reparerats (en eller flera gånger) eller bytts ut så varierar risken att en ny läcka uppstår på samma ledning. Som ANN-modellen är uppbyggd nu kommer man att få samma resultat om den körs på nytt efter att en ledning reparerats. Detta problem är initialt troligen av mindre betydelse då sannolikheten för fler läckor, i ett stort perspektiv, fortfarande finns kvar, utbyten undantaget. Genom att även följa läckageutvecklingen i ledningsnätet kan ANN-modellens resultat korrigeras. Att genomföra en ny ANN-körning ca vart annat eller vart tredje år, där hänsyn tas till vilka nya läckor som uppstår och genomförda utbyten, kommer att ge bättre uppskattningar på vilka läckagefrekvenser som bör användas för respektive ledning. Vid nya modellkörningar är det även möjligt att inkludera mer information om typen av reparationer som har

genomförts vid läckor, och därmed kunna inkludera effekten av dessa i uppskattningen av läckagefrekvenser.

Ledningslängd

En svårighet när resultaten från ANN-modellen diskuteras är att modellen baseras på den uppdelning som gjorts i VA-bolagets databas. Det betyder att vissa sträckor består av en enda lång ledning, medan andra sträckor delas upp i flera ledningar, till exempel för att det finns många förgreningar längs sträckan. I diskussionerna inom projektet Ordning i RörANN framkom att antal läckor per ledning är viktigt mått när man vill gå in och arbeta konkret med en ledning eller ett antal ledningar i ett visst område, medan läckor per ledningslängd är ett bättre mått när man vill räkna ekonomi i planeringen framåt. Om man vill ha information på en mer detaljerad nivå, behöver ledningarna delas upp i fler delar i databasen. Detta kräver dock en avvägning mot att man då måste hantera en större datamängd.

Kombinera med konsekvens för riskanalys

Med riskanalys menas i många sammanhang en uppskattning av sannolikhet för olika händelser i kombination med en uppskattning av konsekvenser av dessa händelser. I begreppet riskbedömning ingår ofta förutom riskanalysen också en utvärdering av vad som är en rimlig eller acceptabel risknivå och när åtgärder behöver vidtas för att minska risken. Begreppen används olika beroende på sammanhang, men här försöker vi följa begreppen så som de definieras i ISO-standarden Riskhantering – Principer och riktlinjer (ISO 31000:2009) så långt det är praktiskt möjligt. Metoderna som beskrivs nedan fokuserar på riskanalysdelen, alltså att förstå riskens natur och avgöra risknivå. En diskussion förs dock kring hur subjektiva värderingar kan påverka hur analysen utformas och avgränsas. Även förutsättningar för riskutvärdering diskuteras, det vill säga hur resultatet från riskanalysen ska utvärderas och hur det kan användas för att styra underhåll och förnyelseplanering.

I remissversionen av Svenskt Vattens skrift P116 Förnyelseplanering av VA-ledningsnät (Svenskt

Vatten, 2019) nämns två typer av risker för vattenledningsnätet, där det ena är en kvantitetsrisk (risk för att inte få vatten) och det andra en kvalitetsrisk (risk att vattnet är av otjänlig kvalitet). Lyfter vi blicken utanför själva dricksvattenssystemet ser vi dock att det finns fler möjliga negativa konsekvenser av ett läckage på en vattenledning. Det kan till exempel handla om mer direkta konsekvenser såsom trafikstörningar och kostnader för återställning av skador på väg eller annan infrastruktur, men det kan också handla om störningar i viktiga samhällsfunktioner som exempelvis sjukhus som inte enbart är relaterade till vattenförsörjningen av dessa. Vidare kan det handla om direkta skador på personer och egendom.

Gemensamt för riskanalyser är att de behöver hantera osäkerheter på olika sätt. Det finns dels osäkerheter i sannolikheten för läckage, dels osäkerheter avseende konsekvenserna av ett läckage. När det gäller konsekvenserna handlar det bland annat om osäkerheter kring vad som faktiskt kan inträffa vid ett läckage, men också om hur troliga dessa möjliga konsekvenser är. Riskanalysen behöver anpassas till målet med analysen, men också förhålla sig till vilken information som finns tillgänglig. I brist på historiska data och statistik kan expertbedömningar och scenarioövningar vara möjliga angreppssätt för att uppskatta risknivåer. Trots begränsningar och osäkerheter behöver riskerna analyseras och värderas, vilket kan göras på många olika sätt.

Metoder för uppskattning av konsekvenser vid läckage

Två huvudtyper av riskanalyser kan urskiljas bland etablerade metoder: kvantitativa och kvalitativa (se exempelvis MSB (2011)). Kvantitativa metoder har som mål att uppskatta sannolikhet och konsekvens i kvantifierbara storheter (exempelvis förväntad frekvens av läckage och kostnader till följd av ett läckage). Kvalitativa metoder innebär i stället att sannolikheter och konsekvenser uttrycks i ord (låg eller hög sannolikhet, liten eller katastrofal konsekvens). Som ett mellanting används även semikvantitativa metoder där rankingskalor med intervaller används. Det går att kombinera meto-

Tabell 3. Faktorer för poängsättning av konsekvenser vid läckage.

Konsekvensgrupp	Konsekvensfaktor
Vattenleverans	Ledningsdim. 150 Ledningsdim. 500 Ledningsdim. 1000 Ansluter till sjukhus Ansluter till förskola Ansluter till vårdhem Ansluter till vattenkänslig industri
Reparation	Under järnväg/t-bana/spårväg Under vattendrag Under byggnad Under markvärme Högtrafikerad väg Saknar skyddsror
Översvämmning	Instängt område med 150 mm vattendjup Instängt område med 500 mm vattendjup Instängt område med 1000 mm vattendjup Låg byggnadstäthet inom område Medel byggnadstäthet inom område Hög byggnadstäthet inom område
Kontaminering	Avloppsledning på samma nivå

derna så att sannolikhetskattningen görs kvantitativt och konsekvenskattningen görs kvalitativt och vice versa.

En kvantitativ uppskattning av konsekvens skulle kunna försöka omfatta summan av alla kostnader som kan följa av ett läckage, exempelvis trafikstörningar och intäktsbortfall för näringslivet. Nackdelen med ett sådant arbete är att det kan bli väldigt omfattande och att det kanske helt enkelt inte går att på rimligt sätt få fram tillräckligt bra underlag. Någon form av avgränsning är i praktiken alltid nödvändig.

I brist på en statistiskt underbyggd bedömning av konsekvenserna kan expertbedömningar användas för att semikvantitativt rangordna konsekvensen från läckage, exempelvis genom att sätta en högre poäng på ledningar som bedöms leda till allvarligare konsekvenser. Ett exempel i den här kategorin är den metod som Svenskt Vatten har tagit fram i P116, (Svenskt Vatten 2019). En semikvantitativ metod kan vara användbar när det är själva prioriteringen mellan olika ledningar som är viktigast, snarare än den absoluta risken. Fördelen med en sådan modell är att den liknar många

redan använda metoder, att datahanteringen är relativt enkelt och att man får en tydlig överblick av prioriteringar. Samtidigt är det risk att poängsättningen blir godtycklig och den är svår att applicera när flera konsekvenser samverkar. Risken är också att poängskalorna blir för grova för att ge meningsfulla skillnader mellan olika ledningar. Vad som ger en tillräcklig noggrannhet behöver testas och utvecklas över tid.

En utmaning med att genomföra en riskanalys för ett ledningsnät är den stora mängden ledningar. Eftersom ledningsdata och annan data ligger lagrat i GIS-system är det rimligt att utnyttja dessa system i arbetet med riskanalysen. GIS kan användas för både kvantitativ och semikvantitativ riskanalys, beroende på hur detaljerat underlag som finns tillgängligt. Men på grund av att mycket information saknas om konsekvenser vid tidigare inträffade läckage så kan inte nuvarande GIS-verktyg ge hela bilden av konsekvenserna.

Inom projektet Ordning i RörANN har möjliga konsekvensuppskattningar diskuterats genom två workshops (i oktober 2019 och juni 2021) och genom ett kontinuerligt arbete som utförts dess-

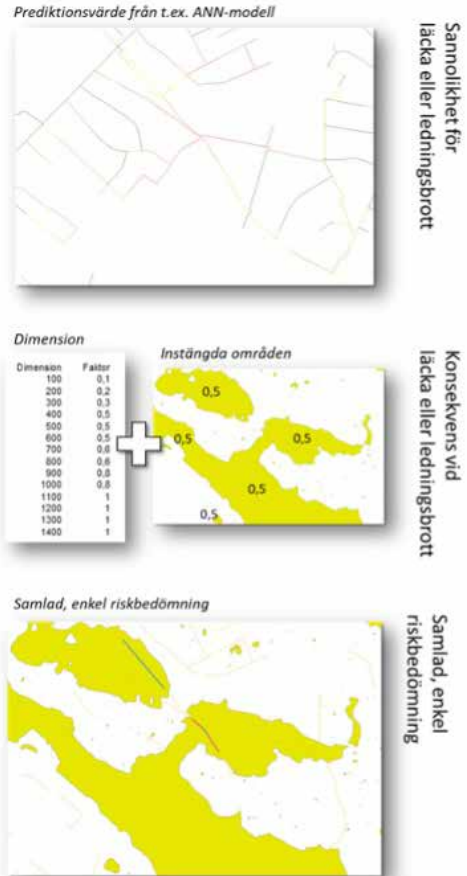
emellan. Under den andra, avslutande workshopen var målet att diskutera förutsättningarna för att identifiera möjliga konsekvenser och att uppskatta deras allvarlighetsgrad. Sammantaget diskuterades två huvudsakliga alternativ; ett med poängsättning av viktiga faktorer (semikvantitativa, med liknande upplägg som Svenskt Vatten (2019)) och ett baserat på kostnadsberäkning av konsekvenser (kvantitativ). De olika varianterna för att uppskatta storleken på konsekvenser presenteras nedan.

Konsekvensuppskattning genom poängsättning

För metoder baserat på poängsättning identifierades följande faktorer (tabell 3) som viktiga och samtidigt möjliga att storleksbestämma utifrån VA-organisationers erfarenheter och datatillgänglighet. Dessa faktorer bygger vidare på de faktorer som har identifierats av Svenskt Vatten (2019). Sammantaget ger de en bred täckning av möjliga konsekvenser, men bör också anpassas till behoven hos respektive VA-organisation. Metoden bygger på att användare poängsätter konsekvenserna som kan tänkas uppstå vid läckage på ledningar med respektive konsekvensfaktor. Poängen kan sedan sammanställas för varje ledning baserat på samtliga konsekvensfaktorer som berör just den ledningen.

En svaghet med denna metod är att det ofta saknas underlag och erfarenhet även hos experter för att kunna göra en väl underbyggd rangordning av konsekvenserna. Att ha med många faktorer ökar osäkerheten hos de som ska sätta poängen. Vid framtida, mer detaljerade riskanalyser kommer det troligen visa sig att det finns ytterligare data för inträffade händelser som skulle kunna samlas in och lagras i GIS-system för att göra riskanalysen mer noggrann. När mer data samlas in kommer det också bli tydligare vilka faktorer som spelar mindre roll och därmed kan uteslutas från analysen.

För att underlätta användandet av poängsättningsmetoder har SVOA diskuterat en förenklad modell där konsekvensen av läckage rangordnas efter ledningsdimension och instängda områden. Dessa faktorer har valts dels för att de redan finns tillgängliga att hantera i GIS-systemet, dels bedöms vara några av de viktigare faktorerna för konsekvens storlek. Som en första ansats föreslås att dimension



Figur 7. Schematisk bild av hur den enkla modellen för uppskattning av konsekvens (ledningsdimension & instängda områden) kan användas i en riskanalys. Prediktionsvärdet från ANN-modellen visas överst som grön för ledningar med låg sannolikhet för läcka och röd för ledningar med hög sannolikhet. Konsekvensvärdet, som visas i mitten, ges utifrån dimension sammanvägt med om ledningen ligger i ett instängt område. Riskkartan i botten visar ett samlat riskvärde där cerise anger hög risk, blå lägre risk och orange lägst risk.

omvandlas till en konsekvensfaktor baserat på en expertbedömning. Om ledningen dessutom ligger i ett instängt område, där en läcka bedöms kunna leda till översvämning, ges ledningen ett visst värde. I SVOA:s fall valde man att peka ut områden som översvämmas mer än 500 mm vid ett extremregn (Köpenhamnsregnet från 2011). Figur 7 ger en schematisk överblick på hur poängsättningen kan se ut i praktiken. Dimensionen på ledningen ger en bild av hur många personer och verksamheter som drabbas vid ett ledningsbrott, där läckage på större ledningar bedöms kunna ge större kapacitetsbortfall och därmed få större konsekvenser. Även de ökade kostnaderna som uppstår vid en akut reparation bedöms generellt kunna bli större för större ledningar. Instängda områden ger en bild av områden där översvämning på grund av läcka är mer troligt, vilket till exempel kan leda till skador på egendom eller trafikstörningar. I den aktuella modellen räknas konsekvensvärdet ut på följande sätt: konsekvensvärdet baserat på dimension (0 till 1) plus ett tillägg på 0,5 för ledningar som ligger inom ett instängt område delas med det högsta möjliga konsekvensvärdet (1,5). Konsekvensvärdet multipliceras därefter med prediktionsvärdet från ANN-modellen (sannolikheten), vilket i sin tur ger ett riskvärde mellan 0 och 1, där 1 är högst risk.

Utifrån dessa komponenter kan metoden utvecklas vidare baserat på datatillgängligheten hos respektive organisation. För att ännu tydligare fånga in den ökade risken som uppstår vid ledningsbrott i centrala delarna av en stad, går det till exempel att väga in befolkningstätheten eller liknande mått på hur många människor som kan tänkas färdas i ett område. En kartläggning av översvämningskänslig infrastruktur eller verksamhet skulle också kunna ingå som indikation på större, möjlig konsekvens. I brist på tillgänglighet till sådan information kan kombinationen av endast ledningsdimension och instängda områden tillsammans utgöra en enkel, användbar metod för att uppskatta storleken på konsekvenserna av en läcka.

Konsekvensuppskattning genom kostnadsberäkning

Ett exempel på en kvantitativ metod är att göra kostnadsuppskattning för möjliga konsekvenser

med målet att bedöma vad den ekonomiska effekten av ett läckage på en viss ledning blir. Fördelen med en sådan metod är att den uppskattade kostnadseffekten är direkt jämförbar med andra utgifter inom organisationen, medan nackdelen är att den kräver ett omfattande dataunderlag och ofta svåra uppskattningar av kostnadseffekter på en VA-organisation över tid. Inom Ordning i RörANN utvecklades första ansatserna till hur en sådan metod kan anpassas till det rådande kunskaps- och dataunderlag som finns hos svenska VA-organisationer. Metoden går ut på att samla in information om konsekvenser från tidigare läckor, både i Sverige och utomlands, och kombinera det med konsekvensfaktorer för respektive ledning. Eftersom flera av konsekvenserna från läckage inte har en direkt ekonomisk koppling till VA-organisationen, till exempel trafikförsening orsakad av en reparation eller översvämning, måste dessa konsekvenser kostnadsuppskattas indirekt. Det ekonomiska värdet av konsekvenser från läckage på särskilda grupper och användare har fått uppmärksamhet nyligen, se till exempel VA SYD (2021) och Sjöstrand m.fl. (2021), men detaljerade studier av hur dessa effekter påverkar och värderas av VA-organisationer saknas. En lösning är att låta experter inom respektive VA-organisation utföra kostnadsuppskattningar av särskilt viktiga konsekvensaspekter, vilka listas i tabell 4 tillsammans med förslag på schablonvärden från Malm m.fl. (2011). När det gäller utebliven vattentillgång är kostnaden inte förlorat vatten utan kostnaden för att få fram alternativ vattentillgång, t.ex. med tankbilar, vilket poängterades av deltagarna i den andra workshopen.

Att uppskatta kostnader för potentiella konsekvenser från läckage för ett stort antal ledningar kräver detaljerad information om både ledningsnät, hydrauliska effekter av läckor, omgivande infrastruktur, trafikpåverkan, samt registrerade konsekvenser av tidigare läckor. I dagsläget saknar många VA-organisationer information med tillräcklig detalj för att detta ska vara praktiskt användbart. I takt med ökad digitalisering av information, samt ökad registrering av konsekvenser från tidigare läckor, ökar möjligheten att kostnadsuppskattningar av den här typen blir användbara.

Tabell 4. Aspekter som behöver kostnadsvärderas för kvantitativ konsekvensberäkning, samt föreslagna schablonvärden och bedömningsmetoder.

Aspekt	Föreslagen enhet	Schablonvärde	Bedömningsmetod
Kundtid utan vatten	SEK/kundtid alt. SEK/läcka	13 000 SEK/läcka ¹	Vattentariffr & expertbedömning
Trafikförsening	SEK/timme, bil SEK/timme, buss	35 SEK/tim/pers ¹ 101 SEK/tim/pers ¹	Tidsvärderingsstudier och trafikanalys
Översvämningsskador	SEK/byggnad	65 000 SEK/ källare ¹	Försäkringsutgifter vid tidigare översvämningar

¹ Malm m.fl., 2011

Reflektioner från projektdeltagarna

Deltagarna i Ordning i RörANN var generellt positiva till de konsekvensuppskattningar som presenterades och diskuterades i den andra workshopen. Olika alternativ till bedömningarna diskuterades. För att undvika svåra diskussioner om att mäta konsekvensernas storlek i absoluta termer diskuterades möjligheterna att rangordna konsekvenserna genom att jämföra dem i förhållande till varandra. Detta är inte heller helt enkelt, men bedömdes av deltagarna som något lättare att genomföra. Det föreslogs också att uppskattningen ersätts med ett spann i stället för enstaka värde eller poäng. Detta ger dock en mer avancerad modell, vilket gör tröskeln högre för att komma i gång.

En svaghet med de föreslagna konsekvensuppskattningarna är att en linjär summering inte fångar upp eventuella synergieffekter mellan de olika faktorerna. Det kan finnas situationer där konsekvensen uttryckt i kostnader blir större eller mindre än summan av de enskilda faktorerna.

Det finns också faktorer som kan komma att väga in både på sannolikhetssidan och konsekvenssidan. Vid andra workshopen nämndes t.ex. gjutjärnsledningar och PVC-ledningar från tidigt 70-tal. De har högre sannolikhet att springa läck, och torde därför få ett högt prediktionsvärde, samtidigt som konsekvenserna bedöms bli extra stora för dessa ledningar, enligt deltagarna i workshopen. Gjutjärnet går i sönder många gånger när det väl blir dåligt och för PVC-ledningarnas del handlar det om att limningen släpper med stora konsekvenser. Det kan alltså vara relevant att lägga till

material som en faktor som styr allvarlighetsgraden för konsekvensen.

Planering av underhåll och förnyelse

Nuvarande modeller för planering av underhåll för VA-ledningar bygger i dagsläget ofta på subjektiva antaganden och enklare analyser. Många VA-organisationer använder sedan början av 1990-talet databaser för att lagra information om driftstörningar, vilket är positivt. I projekten Care-W och Care-S, (Saegrov 2005 & 2006), vilka finansierades av Europeiska kommissionen, diskuterades hur underhållsverksamheten av VA-ledningsnät kan förbättras och preciseras med hjälp av datorstöd. Projektet demonstrerade en rad möjligheter, men dessa tycks ännu idag ouppnåeliga för många svenska VA-organisationer. En viktig slutsats från nämnda projekt och deras följdprojekt, Aware-P, är att riskanalys för prioritering är en viktig aktivitet i sammanhanget. Projektet Ordning i RörANN visar exempel på hur man med hjälp av en sannolikhetsberäkning, tillsammans med en uppskattning av konsekvenser av olika händelser, kan anamma ett mer riskbaserat arbetssätt. Detta är även en viktig intention inom området tillgångsförvaltning, eller asset management som det omnämns på engelska.

De riskanalysmetoder som föreslås här är menade att användas för smartare beslutsstöd i planering av underhåll och förnyelse av dricksvattenledningar, till exempel för att peka ut vilka områden eller ledningar som bör prioriteras för vidare undersökning i fält eller för att bedöma behovet av

reinvestering och göra ekonomiska kalkyler för detsamma.

Det är viktigt att vara tydlig med vilka risker det är man försöker hantera i riskanalysen. I detta fall är fokus på risker kopplade till utläckande vatten, medan till exempel risken för spridning av föroreningar via dricksvattnet inte tas med. Det spelar också roll för resultaten om man huvudsakligen fokuserar på att minska vattenspill eller om man lägger tonvikten vid att minska risken för andra skador. Här kan värderingen av risk bli intressant och olika aktörers syn på risk kan i framtida projekt behöva undersökas för att utreda hur olika risker ska hanteras beroende på hur de värderas. Det är troligtvis så att det inte bara är VA-bolagets kostnader som är intressanta att ta hänsyn till utan även kostnader eller effekter som drabbar andra aktörer i samhället bör beaktas. Det är dock inte självklart var gränserna ska dras. Detta blir speciellt intressant när metoder för att storleksbestämma olika konsekvenser ska utvecklas. Var ska gränsen dras för vilka effekter som ska räknas in i den risk som ledningsförvaltaren ansvarar för?

I arbetet med VA-ledningsnät och risker finns en upplevelse av att det finns väldigt många konsekvenser som kan ställa till det och orsaka stor skada. I ett generellt riskanalysperspektiv kännetecknas stora konsekvenser ofta av:

- Störningar för VA-försörjningen under flera dagar
- Natur- eller kulturmiljö alt. växt- och djurliv får svåra skador som inte går att återställa
- Egendomsförluster, merkostnader, eller förlorade intäkter som överstiger 100 miljoner kr
- Dödsfall

Troligen kommer de flesta vanliga läckor som uppstår inte i närheten av stora konsekvenser i nivå med de som beskrivs ovan. Många små läckor kan dock sammantaget leda till ett stort vattenspill vilket i det långa loppet kan orsaka stor skada. Det är också möjligt att enskilda läckor skulle kunna ge

upphov till mer ovanliga och allvarliga konsekvenser. Det kända ledningsbrottet på en fjärrvärmeledning i Lund tidigt i februari 2015 kan användas för att illustrera svårigheterna med att försöka uppskatta konsekvenserna av olyckor på ledningsnät. Vid denna händelse dog en person och flera skadades på grund av att en buss körde på dem i den täta dimma som bildades till följd av ledningsbrottet. Denna händelse var svår att förutsäga, och ett likadant scenario kommer högst troligen inte att inträffa vid en dricksvattenläcka, men samtidigt är det inte ovanligt att extrema händelser får just konsekvenser som ingen föreställt sig (Sörensen & Mobini, 2017). I en riskanalys behövs alltså en förberedelse och en förståelse för att alla scenarion inte kan fångas upp.

En viktig del i användning och kommunikation av resultaten från Ordning i RörANN är att det inte fångar upp samtliga risker förknippade med vattenledningsnätet och därmed inte kan vara det enda verktyget som används för prioritering av underhåll och förnyelseplanering. I Livsmedelsverkets handbok Risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning, (Livsmedelsverket 2007) och remissversionen av P113 Effektivt underhåll av VA-system från Svenskt Vatten (2019) listas många andra exempel på oönskade händelser som kan leda till försämrade vattenkvalitet eller leveransproblem. Det som dessa publikationer inte ger någon vägledning kring är hur skador som uppstår utanför själva vattenledningsnätet kan analyseras. Som resonemanget ovan visat kan det dock vara relevant för VA-förvaltaren att lyfta in även dessa aspekter och utvärdera sådana mer externa risker. En riskanalys med resultaten från ANN-modellen i kombination med en konsekvensuppskattning baserat på GIS-analys ger alltså inte hela bilden av risker förknippade med vattenledningsnätet, men kan ändå vara en viktig delmängd i arbetet med risk- och sårbarhetsanalys som underlag för prioritering av underhåll och förnyelse av ledningsnäten.

En fördel med att jobba mot att försöka uppskatta konsekvenser i kronor är att det kan ge en större jämförbarhet mellan olika typer av risker, eftersom de slutligen värderas med samma mått. Som exempel skulle ANN-modellen då kunna

kombineras med en riskmodell som uppskattar kostnaderna för smittspridning på grund av felkopplingar, och prioriteringsordningen för att leta upp och förebygga olika typer av fel skulle då kunna bli mer precis.

För de konsekvensuppskattningar som redovisats ovan ligger flera, ganska grova, antaganden bakom och den är avgränsad till att hantera en delmängd av riskerna med ett vattenledningssystem. För att inte modellresultaten ska misstolkas är det viktigt att säkra att det finns kunskap och förståelse för helheten när det gäller risk- och sårbarhetsanalys av vattenledningsnätet och hur modellresultaten från ANN-modellen ska tolkas. Där är dokumentation av alla antaganden en viktig del.

Rutiner för uppdatering

Vid diskussionerna inom projektet framkom att det är viktigt att utarbeta arbetsrutiner som tydliggör 1) hur ofta ANN-modellen ska köras och en ny konsekvensuppskattning görs, 2) när det är läge att eventuellt omvärdera poängsättningen, 3) hur databaserna uppdateras när verksamheter flyttar, etc. Eventuellt bör man inte ta med flyttbara verksamheter i konsekvensanalysen alls eftersom arbetet är tänkt att fungera proaktivt. Därför bör endast sådant tas med som kan tänkas finnas kvar inom den period som avses. Det är viktigt att rutinerna utarbetas så att arbetet blir repeterbart och att eventuell handpåläggning i analyserna minskas.

Sammanfattning

Utvärderingen av både nya och historiska läckor hos SVOA visar att högre prediktionsvärde från ANN-modellen är tydligt kopplade till högre förekomst av läckor. Detta visar att ANN-modellen lyckas med att identifiera en del av de kombinationer av attribut som leder till läckor. Sambanden mellan prediktionsvärde och antal läckor har använts för att knyta läckagefrekvenser, både per ledning och per ledningslängd, till prediktionsvärdena. Dessa läckagefrekvenser kan användas som underlag för det proaktiva arbetet med ledningsunderhåll, vilket ger en högre precision i arbetet än vad som tidigare var möjligt.

Detta projekt bidrar med vidareutveckling av arbetet med AI för ledningsunderhåll i VA-branschen. Ett viktigt resultat av projektet har varit att se att ANN-modellen ger ett pålitligt och statistiskt säkerställt resultat. Tekniken ger bra förutsättningar för att kunna hitta de ledningarna som har störst sannolikhet för läckage. Genom att kombinera ANN-modellen med en modell för att uppskatta storlek på konsekvenser kan de prioriterade ledningarna när det gäller risker förknippade med läckor vaskas fram. I denna artikel har tre olika varianter presenterats. De olika varianterna kräver olika mycket data men förväntas också ge olika bra bedömningar. När en risknivå beräknats kan både kontinuerligt underhåll och planering av investeringar göras mer effektivt. För förbättrad precision och användning av metoderna för konsekvensbedömning krävs det dock ökad datainsamling om konsekvenserna som uppstår vid läckor. Systematisk datainsamling av de största konsekvenserna vid läckor, främst uppkomna driftstörningar, direkta kostnader och utbetalning av skadestånd, skulle möjliggöra en stor förbättring av framtida riskbedömningar inom dricksvattensystem. Den här typen av modell för riskanalys av läckor i kombination med riskanalyser för andra typer av fel samt information om andra prioriteringar ger VA-förvaltarna ökade möjligheter att använda sina resurser där de gör mest nytta.

Tack till

Vi vill speciellt tacka alla som engagerat sig i projektet Ordning i RörANN – en smart ANN-modell för minskat läckage på dricksvattennätet. Förutom Lunds Tekniska Högskola och Stockholm Vatten och Avfall har Sweden Water Research, VAKIN, Göteborg Kretslopp och Vatten och VA SYD varit partners i projektet. MSVA, MIVA, Uppsala vatten, Ängelholm och NSVA samt Svenskt Vatten har aktivt följt projektet som intressenter och bidragit med ytterligare kunskap och erfarenhet. Formas och Vinnova har stötta projektet ekonomiskt genom Smart Built Environment tillsammans med alla partners.

Referenser

- Livsmedelsverket (2007) Risk- och sårbarhetsanalys för dricks-
vattenförsörjning. ISBN: 91-7714-185-7. Uppsala.
- Malm, A., Horstmark, A., Jansson, E., Larsson, G., Meyer,
A., Uusijärvi, J. (2011) Handbok i förnyelseplanering av
VA-ledningar. SVU-rapport 2011–12
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) (2011)
Vägledning för risk- och sårbarhetsanalyser. ISBN 978-91-
7383-129-1
- Nilsson, D. (2020) ANN-modell för att bestämma renover-
ingsbehov av vattenledningar: utvärdering av viktiga attribut
med tillämpning för Umeå kommun. Examensarbete vid
Lunds Tekniska Högskola.
- Rehn, D., Giertz, T. (2019) En AI-modell för vattenled-
ningsnätet – Test av möjligheter med riskstyrning av
underhåll och planeringsverksamhet. Rapport 19MB262.
Stockholm Vatten och Avfall.
- Saegrov, S. (2005) Care-W, Computer aided rehabilitation of
water networks, IWA Publishing
- Saegrov, S. (2006) Care-S, Computer aided rehabilitation of
sewer networks, IWA Publishing
- Sjöstrand, K., Klingberg, J., Zadeh, N.S., Haraldson, M.,
Rosén, L., Lindhe, A. (2021) The value of water – Estimat-
ing water disruption impacts on businesses. *Water*, 13(11).
<https://doi.org/10.3390/w13111565>
- Svenskt Vatten (2019) Förnyelseplanering av VA-ledningsnät.
Remissversion 2019-09-26. Publikation P116.
- Sörensen, J., Mobini, S. (2017) Pluvial, urban flood mecha-
nisms and characteristics – Assessment based on insurance
claims. *Journal of Hydrology*, 555, 51–67. [https://doi.
org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.039](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.039)
- VA SYD (2021) Vad kostar ett hål i gatan? Fallstudie på sam-
hällsekonomiska kostnader för vattenläckan Studentgatan –
Södra Promenaden i Malmö. Rapport februari 2021.