Svenskt Vatten
UTVECKLING

Rapport
Nr 2024-8

VA-verksamheters arbete med tryckslag

En kartläggning av dagens svenska förhållanden och jämförelse med år 1980

Kristofer Kiste

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma
BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma
TELEFON 08-506 002 00
E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Bibliografiska uppgifter
Nr 2024-8

RAPPORTENS TITEL	VA-verksamheters arbete med tryckslag. En kartläggning av dagens svenska förhållanden och jämförelse med år 1980
TITLE OF THE REPORT	Water and sewage utilities approach to water hammer. An assessment of current Swedish conditions and comparison with 1980
FÖRFATTARE	Kristofer Kiste, Envidan AB
RAPPORTNUMMER	2024-8
ANTAL SIDOR	60
SAMMANDRAG	Tryckslag är ett fenomen som uppstår i ledningsnät när en driftförändring utförs. Manövrering av ventiler, hastig pumpstart eller hastigt pumpstopp skapar tryckvågor i ledningssystemet. Är tryckvågorna stora kan ledningarna brista till följd av allvarliga över- eller undertryck. Tryckslagen kan även vara en direkt orsak till försämrad dricksvattenkvalitet. En kartläggning utförd 1980 visade att kunskapen om tryckslag var låg och att incidenter med tryckslag förekom. Den här studiens syfte var att kartlägga om situationen år 2024 liknade den på 1980 talet, vilket den visade sig göra.
SUMMARY	Water hammer is a phenomenon that occurs in piping systems when operational changes are made. Manipulation of valves or sudden pump startups or shutdowns create pressure waves in the piping system. If waves are significant, the pipes may burst due to severe over- or under-pressure. A survey conducted in 1980 demonstrated a lack of knowledge about water hammer and that incidents occurred. The purpose of this study was to determine if the situation today resembles that of the 80s, which was the case.
SÖKORD	Tryckslag, hydrauliska transienter, övertryck, undertryck, tryckvåg, ledningsbrott, utmattning, tryckslagsreducering, tryckslagsmodellering
KEYWORDS	Water hammer, surge, hydraulic transients, upsurge, downsurge, pressure wave, burst, fatigue, water hammer reduction, surge modelling
MÅLGRUPPER	Kommuner, VA-huvudmän, konsulter, entreprenörer, universitet
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGSÅR	2024
UTGIVARE	©Svenskt Vatten AB
REFERENS	Kiste K. (2024). *VA-verksamheters arbete med tryckslag. En kartläggning av dagens svenska förhållanden och jämförelse med år 1980.* SVU-rapport 2024-8. Stockholm: Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	22-116
PROJEKTETS NAMN	Utvärdering av VA-bolagens arbete med transienter
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling

Förord

Uppkomsten av tryckslag i ledningsnät har länge varit känt inom VA-branschen och de flesta har någon gång hört talas om fenomenet. Förståelsen har tidigare varit begränsad och den senaste kartläggningen i Sverige, utförd 1980, visade att tryckslagsproblematik uppstod i ledningsnäten. Den allmänna kunskapen var generellt låg och den praktiska möjligheten att utföra tryckslagsberäkningar var ett hinder. Det har gått 44 år och VA-branschen har på många sätt utvecklats, men frågan är om kunskapen om tryckslag har hängt med. Studien syftade till att kartlägga hur kunskapen och arbetet kring tryckslag ser ut 2024.

Jag vill tacka Svenskt Vatten för finansiering och möjligheten att få utföra denna studie. Projektet har inneburit fantastiska möten med engagerade personer i branschen, både inom akademin, på konsultsidan och hos VA-verksamheterna. Möjligheten att få föreläsa för så många VA-verksamheter har varit inspirerande, lärorikt men framför allt mycket roligt.

Ett stort tack riktas till samtliga deltagare hos sex lärosäten, 14 konsulter och 96 kommuner som deltog i studien. Jag vill även tacka Gilbert Svensson, Bernt Persson, Lennart Jönsson och Olle Ljunggren för intressanta diskussioner och bidrag med värdefull information kring hur tryckslagsfrågan utvecklats de senaste 40 åren. Ett stort tack ska också riktas till Mire Persmark för bidrag till rapporten och korrekturläsning.

Ett särskilt tack riktas till projektets referensgrupp bestående av:

- Magnus Bäckström, Bodens kommun
- Erik Karlsson, Svenskt Vatten
- Johan Lager, Envidan AB
- Victor Pelin, NSVA
- Kenneth M Persson, Lunds tekniska högskola
- Johan Spännare, DHI Sverige AB

Jag hoppas projektet bidragit med att lyfta upp tryckslagsfrågan på agendan, och förhoppningen är att fler intresserar sig för detta mycket spännande ämne.

Helsingborg 2024
Kristofer Kiste, Envidan AB

Innehåll

Förord ... 2
Sammanfattning ... 4
Summary ... 5

1 Inledning ... 6
1.1 Bakgrund ... 6
1.2 Syfte ... 7
2 Metodik ... 8
3 Teoretisk beskrivning av tryckslag ... 11
3.1 Fysikalisk konsekvens av tryckslag ... 11
3.2 Orsak till tryckslag ... 12
3.3 Tryckslagsreducerande åtgärder ... 13
3.4 Ledningsbelastning ... 19
4 Historisk utveckling av tryckslag i Sverige ... 21
4.1 Slutsatser från kartläggning år 1980 ... 22
4.2 Intervju med erfarna personer ... 23
5 Utbildning om tryckslag på lärosäten ... 25
6 Tryckslag hos VA-huvudmännen ... 26
6.1 Förebyggande arbete med tryckslag ... 27
6.2 Uppkomna tryckslagsfall ... 33
6.3 Förekomst av mätning ... 35
6.4 Backventiler ... 36
6.5 Driftarbete ... 37
6.6 Kreativa säkerhetslösningar ... 39
6.7 Förekomst av tryckslagsreducerande åtgärder i landet ... 40
7 Tryckslag hos konsulter ... 42
7.1 Kompetens ... 42
7.2 Programvaror ... 43
7.3 Kunskapsbredd hos konsulter ... 45
7.4 Vem initierar frågan? ... 46
8 Omvärldsbevakning ... 48
8.1 Goda standarder ... 48
8.2 Smarta tryckslagsmätare ... 48
8.3 Kostnad för läckor ... 49
9 Diskussion ... 51
9.1 VA-verksamheter ... 51
9.2 Konsulter ... 53
9.3 Utbildningsmöjligheter ... 53
9.4 Jämförelse med utvärdering från 1980 ... 54
10 Slutsatser ... 56
11 Råd för framtiden ... 58

Referenser ... 59

Sammanfattning

Tryckslag är ett fenomen som uppstår i ledningsnät när en driftförändring utförs. Manövrering av ventiler, hastig pumpstart eller hastigt pumpstopp skapar tryckvågor i ledningssystemet. Är tryckvågorna stora kan ledningarna brista till följd av allvarliga över- eller undertryck. Tryckslagen kan även vara en direkt orsak till försämrad dricksvattenkvalitet. En kartläggning utförd 1980 visade att kunskapen om tryckslag var låg och att incidenter med tryckslag förekom. Den här studiens syfte var att kartlägga om situationen år 2024 liknade den på 1980-talet, vilket den visade sig göra. Det krävs ett kunskapslyft i branschen.

När en tryckledningsdesignklass ska väljas är det lätt att ta utgångspunkt från det maximala trycket som pumpen levererar, för att därefter lägga på en säkerhetsmarginal. Hänsyn måste emellertid tas till de tryckslag som uppstår vid snabba flödesförändringar i ledningssystemen vid exempelvis strömavbrott, manövrering av ventiler eller snabba förändringar av uttag. Tryckslagen adderas till ledningens rådande tryck och VA-ingenjören behöver försäkra sig om att potentiella över- eller undertryck inte förstör tryckledningarna.

Studien utgick huvudsakligen från olika typer av enkäter och intervjuer. Enkäter och intervjuer som utfördes med VA-verksamheterna syftade till att kartlägga hur tryckslagsarbetet bedrivs proaktivt och reaktivt, vilken kunskap som finns i verksamheten samt om det har förekommit läckor eller incidenter som misstänkts bero på tryckslag. En enkät skickades till de större konsultfirmorna i landet med syfte att kartlägga hur utbredd kunskapen är på konsultsidan. För att kartlägga utbildningsmöjligheterna utformades en enkät till de sex större lärosätena i landet. Intervjuer genomfördes även med fyra erkänt duktiga hydrauliker med lång arbetslivserfarenhet med syfte att kartlägga deras syn på hur tryckslagsfrågan utvecklats de senaste 40 åren.

Studien visar att kunskapen i branschen fortfarande är mycket låg. Vid projektering av nya ledningar är tryckslagsbedömningar snarare undantag än regel, samtidigt som den övervägande andelen VA-verksamheter rapporterar uppkomst av läckor till följd av tryckslag. Den generella kunskapen hos konsulterna är låg, och det är dessvärre ingen självklarhet att tryckslagsfrågan tas upp inom projekt som behandlar trycksatta system. Inget lärosäte erbjuder enskilda kurser inom tryckslag, och enbart tre berör överhuvudtaget frågan genom maximalt en föreläsning och en övning.

Det krävs ett generellt kunskapslyft i branschen, dels i syfte att minska antalet läckor i ledningssystemen, dels för att garantera arbetsmiljön för driftoperatörer. Rapporten ger förslag på bättre samverkan mellan lärosäten och VA-verksamheter för att säkerhetsställa kunskapsnivån hos VA-ingenjörer.

Ett övergripande samarbete bör initieras för att tydliggöra en arbetsmetodik kring tryckslag, så att VA-verksamheter och konsulter får ett tillgängligt verktyg för att bedöma om det är tillräckligt med enklare tryckslagsbedömningar eller om det behövs avancerade beräkningar. Denna arbetsmetodik inarbetas lämpligen i en revidering av VAV P58, *Tryckslag i VA-anläggningar*, så att publikationen bättre kan fungera som ett arbetsverktyg för konsulter och VA-verksamheter. Rapporten rekommenderar också att fortbildningskurser tas fram hos branschorganisationer inom VA för att möjliggöra ett kunskapslyft bland VA-ingenjörer i branschen.

Summary

Water hammer is a phenomenon that occurs in piping systems when operational changes are made. Manipulation of valves or sudden pump startups or shutdowns create pressure waves in the piping system. If waves are significant, the pipes may burst due to severe over- or under-pressure. A survey conducted in 1980 demonstrated a lack of knowledge about water hammer and that incidents occurred. The purpose of this study was to determine if the situation today resembles that of the 80s, which was the case. An improvement in knowledge is required in the industry.

When choosing the design code for pressurized pipes, one might only consider the maximum pump pressure given at a design flow rate and then add a safety margin. However, consideration should be given to water hammer that occurs during rapid changes in fluid velocity in piping systems, such as power outages, valve manipulation, or rapid water withdrawal. Water hammer overlay the existing pressure in the pipeline, and utility engineers need to ensure that potential over- or under-pressures do not compromise the pipeline design code.

The conducted methodology was quantitative research by surveys and interviews. A survey was sent to water and wastewater utilities to assess how proactive and reactive water hammer management was conducted, organizational knowledge in the matter, and whether there were leaks or incidents suspected to be caused by water hammer. A survey was sent to the major consulting firms in Sweden to assess the extent of knowledge in the consulting business. A survey was designed for the six major universities in Sweden to assess educational opportunities. Interviews was also held with four expert hydraulic engineers with extensive work experience to assess how water hammer has developed last 40 years.

The study shows that knowledge about water hammer is still insufficient. When designing new piping systems, water hammer assessments are more of an exception than a rule, while most water and wastewater utilities report leaks caused by water hammer. The general knowledge among consultants is low, and water hammers are not always addressed within pressure piping projects. No university offers individual courses on water hammer, and only three refer to the topic with at most one lecture and one exercise.

A general increase in knowledge is needed throughout the industry to reduce the number of leaks in piping systems and to ensure the work environment for operational staff. Suggestions are made for better collaboration between universities and water and wastewater utilities to ensure the knowledge level of utility engineers.

An overarching collaboration should be initiated to formulate a methodology for addressing water hammer, so that water and wastewater utilities and consultants have an accessible tool to assess whether simpler water hammer assessments are adequate or if advanced calculations are required. This methodology is preferably added to a revision of VAV P58 *Tryckslag i VA-anläggningar*, to adapt the publication to a better work tool for consultants and utilities. Furthermore, the development of education courses by the water and wastewater industry organizations are recommended to promote an increase in knowledge among utility engineers.

1 Inledning

Hydrauliska transienter eller populärt tryckslag, är instationära (dvs. tidsberoende) strömningsförhållanden som uppkommer när snabba hastighetsförändringar utförs i trycksatta system. Hastighetsförändringarna kan vara avsiktliga eller oavsiktliga. När exempelvis en pump eller ventil stängs, alternativt ändrar läge, initieras hastighetsförändringar i systemet. Är pump- eller ventilmanövreringen abrupt, såsom vid ett strömavbrott, bildas kraftiga tryckvågor i ledningen som skapar momentana under- och övertryck i rörsystemet. Detta skapar ett ökat slitage på rörsystemen och i värsta fall ledningsbrott, potentiellt med ekonomiska eller allvarliga arbetsmiljömässiga konsekvenser som följd.

Även tryckslag av mindre storlek uppstår och har negativ inverkan på ledningsnätet. Frekvensen av dessa är betydligt högre, vilket innebär ökad belastning på ledningsnätet med risk att rörens livslängd reduceras. Ökad förståelse för hydrauliken och tryckslagen skulle sannolikt leda till bättre driftförhållanden och således ett hållbarare VA-ledningsnät. Även underhållskostnaderna reduceras till följd av att ledningssystemet utsätts för mindre utmattningsrisker och i slutändan färre läckor.

Betydande tryckförändringar i ledningssystemet kan även leda till återkommande uppslamning av sediment samt släpp av biofilm på insidan av rörväggar (Weston et al. 2021). Även förekomst av undertryck i ledningssystemet riskerar insug av ovidkommande vatten till dricksvattennätet, som potentiellt kan generera infektionsspridning via vattendistributionssystemet (Odhiambo et al. 2023). Tryckslagen kan i flertalet fall vara en direkt orsak till försämrad vattenkvalitet i ledningsnäten.

Ett proaktivt och kontinuerligt arbete kring tryckslag reducerar risken för att tvära stängningar eller pumpavbrott skadar ledningsnätet. Även oförklarliga driftfenomen i ledningsnätet kan motverkas genom förbyggande arbete kring tryckslag. En fysikalisk förståelse för tryckslagsfenomenet är viktig, för att på förhand kunna kvantifiera risker med tryckslag i VA-ledningssystemet så att rätt tryckslagsreducerande åtgärder kan implementeras.

1.1 Bakgrund

Rådande trend hos VA-verksamheter är att behandlingsystemen för vatten och avlopp centraliseras. Flera vatten- och avloppsreningsverk byggda på 1960- och 1970-talet börjar bli uttjänta och i behov av omfattande renovering. Behandlingsprocesser utvecklas och VA-verksamheter ser synergieffekter med att centralisera sin rening.

Längre trycksatta överföringsledningar riskerar att ge ökade bekymmer med tryckslag. Tryckslag uppstår vid snabba förändringar i hastighet, vilka initierar tryckvågor som fortplantas med hög utbredningshastighet, ofta mellan 400 och 1200 m/s. Historiskt har pumpledningar varit kortare vilket generellt är gynnsamt ur tryckslagshänseende. Detta då reflekterade tryckvågor återkommer innan höga tryck byggs upp, eftersom vågornas periodtid understiger ventilers och pumpars stängningstider. För längre överföringsledningar ökar periodtiden och den positiva inverkan från reflektionen minskar. Det ställs därmed högre krav på noggrannare bedömningar av stängningshastigheter för pumpar och ventiler för att kraftiga tryckslag inte ska uppstå.

Tryckslag riskerar att skapa brott- och utmattningsproblem i ledningssystem, vilket innebär ökade kostnader för ledningsrenovering och minskad livslängd för ledningar. I värsta fall kan brotten leda till personskador. Över- och undertrycken som skapas vid driftförändringar behöver därför kvantifieras.

Utvärdering av risker för tryckslag bör vara en självklar del vid projektering och utredning av trycksatta system. I början av 1980-talet utförde Jönsson (1980) en genomlysning av Sveriges kommuner kring deras arbete med tryckslag. Slutsatsen Jönsson drog var att flertalet kommuner hade problem med tryckslag i VA-ledningsnäten och att det var ett fenomen konsulter och ledningsägarna inte hade tillräcklig kunskap inom.

Under våren 2021 följdes dessa slutsatser upp av en kort studie som riktades till sju kommuner eller kommunala VA-bolag (Kiste 2022). Resultaten var likartade och det framkom att det fortfarande uppstår problem med ledningsbrott och läckor hos ledningsägarna till följd av tryckslag.

En mer gedigen genomlysning önskades vilket föranledde denna studie.

1.2 Syfte

Syftet med projektet var att utföra en genomlysning av VA-verksamheters arbete avseende tryckslag. Studien var tänkt att bedöma vilken hänsyn VA-verksamheter tar till tryckslag i utrednings- och projekteringsskeden, men även hur driftorganisationen arbetar med riskerna. Även organisationers förmåga att överföra kunskap kring tryckslag mellan interna avdelningar skulle bedömas. Slutligen skulle det utvärderas om det finns utarbetade rutiner/riktlinjer för lärdoms- och erfarenhetsåterföring som kan efterföljas vid uppkomna skador till följd av tryckslag.

Övergripande frågor som önskades besvaras inom studien var följande:

- Finns det problem i Sveriges gemensamma VA-ledningsnät med tryckslag?
- Har VA-verksamheterna tydliga tillvägagångssätt för hur tryckslag ska förebyggas och hanteras?
- Vilken kunskap finns hos VA-huvudmän och konsulter inom tryckslag?

Studien syftade även till att följa upp rapporten utförd av Jönsson (1980) och bedöma om det skett någon förändring i arbetet med tryckslag på 40 år.

Målet med studien var att inleda en generell kompetenshöjning beträffande tryckslag för att i förlängningen förbättra användningen av, och förhindra skador på, VA-verksamheters ledningsnät. En ökad förståelse kring fenomenet kommer att öka lyhördheten och samverkan kring problemet med följdeffekt av ett hållbarare VA-ledningssystem.

2 Metodik

Metodiken för studien utgjordes av en kombination av intervjuer och frågeformulär som skickats till VA-bolag, kommuner samt de större konsulterna i landet. Intervjuer har även genomförts med ett antal personer som innehar en gedigen arbetslivserfarenhet inom hydraulik och delvis tryckslagsfrågor. Även kursutbudet inom tryckslag hos de större lärosätena i landet har sammanställts genom utskick av en enkät till kursansvariga för de VA-kurser som erbjuds.

Fyra olika frågeformulär utarbetades:
- VA-verksamheter
- Konsultbolag
- VA-ingenjörer med gedigen arbetslivserfarenhet inom hydraulik
- Lärosäten

Frågeformuläret som skickades till VA-bolagen och kommunerna indelades i två delar där den ena avsåg projektorganisationen och den andra driftorganisationen. Frågeformuläret till konsulterna utfördes anonymt med syfte och förhoppning att reducera risken för att företagen skulle nyansera kunskapsläget.

Yrkesrollen hos de personer som svarade på enkäten riktad till VA-verksamheterna varierade, men var huvudsakligen VA-chefer, mellanchefer för projekt- eller driftorganisationen eller VA-strateger med ansvar för de trycksatta ledningsnäten. I de VA-verksamheter som besöktes (33 st) sammanställdes frågesvaren i grupp (varierade mellan ca 2 och 15 personer). De konsulter som besvarade enkäten var, bortsett från något enstaka undantag, avdelnings- eller regionchefer inom sin organisation. Samtliga frågesvar utgår därmed från vilken överblick och engagemang respektive svarande hade i att genomsyra sin organisation.

Följande frågor ställdes inom de respektive frågeformulären.

VA-verksamheter

Projektorganisation:
1. Utförs det tryckslagsberäkningar vid samtliga ny- och ombyggnationer av pumpstationer/tryckstegringsstationer?
2. Finns det övergripande riktlinjer eller styrdokument som tydliggör för projektledare när överslagsberäkningar för tryckslag är tillräckliga mot när avancerade tryckslagsutredningar behöver utföras?
3. Finns det kännedom om *Svenskt Vattens publikation VAV P58 Tryckslag i VA-anläggningar* (VAV 1988) och nyttjas den i arbetet? Finns det behov/önskemål om att utveckla den?
4. Hur säkerhetsställer man att framtagna resultat från tryckslagsutredningar överförs till driftoperatörerna så att de även i stressade situationer har kunskap kring känsliga stängningsförlopp, nödvändiga nivåer i hydroforer, funktion på avluftningsventiler, etc.?
5. Har man utvärderat sitt befintliga ledningssystem med hänsyn till var det finns risker för tryckslag?
6. Läggs det stor vikt vid utvärdering av ledningsprofilen med hänsyn till hydrauliska förhållanden och tryckslag, eller baseras det vanligen på optimering av plansträckning och fördelar vid anläggande?
7. Utvärderas eventuella tryckslag från abrupt backventilsstängning som underlag för val av korrekta backventiler för respektive pumpstation/tryckstegringsstation?

8. Finns det en trygghet hos projektledare att framtagna tekniska lösningar för trycksatta ledningssystem aldrig riskerar leda till allvarliga arbetsmiljöskador?

Driftorganisation:

9. Vilken typ av skador har uppstått på VA-ledningssystemet p.g.a. påvisade tryckslag? Har man utrett orsaken till dessa?
10. Utreds samtliga läckor och skador på trycksatta ledningar utifrån att potentiella tryckslag uppstått?
11. Går det att härleda att tryckslag i större omfattning uppstår i vissa typer av ledningsnät? Ex. beroende på dimensioner, flöden, geografiska förhållanden, driftbeteenden, pumpstyrning mm.
12. Vilka är de vanligaste orsakerna till större flödesförändringar i ledningssystemet?
13. Där tryckslag fastställs – Åtgärdas problemet med en tryckslagsreducerande åtgärd och dokumenteras orsaken och lösningen?
14. Hur säkerhetsställer driftansvariga att driftoperatörer har kännedom om stängningsförlopp som kan vara farliga för vissa överföringsledningar?
15. Finns det exempel på tillbud eller olyckor på personal där orsaken har varit ett tryckslag? Om ja, beskriv omständigheter, orsak och påföljd.
16. Förmedlas det till driftoperatörer vilka arbetsmiljömässiga risker som uppstår vid felaktigt hanterad utrustning? Finns informationen dokumenterad och lätt tillgänglig så att driftoperatörer är medvetna när de befinner sig vid en känslig ventil eller liknande?
17. Finns det övergripande rutiner kring smarta säkerhetslösningar som minimerar risken för tryckslag? Ex. förreglingar som gör att känsliga ventiler inte kan stängas för fort, redundans på hydroforer, kompletterande vakuumventiler vid dubbelverkande avluftningsventiler, ”katastrof”-sprängbleck.
18. Hur säkerhetsställer man att framtagna tryckslagsmitigerande åtgärder underhålls tillräckligt? Ex. underhåll av avluftningsventiler, erforderliga nivåer i hydroforer, oljepåfyllning i hydraulstyrda oljebromsar på backventiler, etc.?
19. Har organisationen tillgång till högupplösta tryckgivare/mätare (1 000 Hz) för datainsamling av snabba tryckförändringar? Om ja, är dessa portabla eller fast monterade?
20. Finns det några typer av åtgärder i ledningssystemet som ni bedömer har försämrat tryckslagssituationen?

Utöver frågorna efterfrågades det även att VA-verksamheterna skulle sammanställa vilka olika tryckslagsreducerande enheter som återfinns inom deras respektive ledningsnät.

Konsulter

1. Hur många, på nationell nivå, besitter kompetens att modellera och analysera tryckslag i ledningssystem?
2. Finns det internationell kompetens som besitter kompetens att utföra tryckslagsberäkningar? Om ja, uppskatta antalet medarbetare samt var de är lokaliserade (Norden, Europa, världen)?
3. Besitter gemene projektör/utredare kompetensen att lyfta frågan avseende om tryckslagsberäkningar behöver utföras eller ej?
4. Vilka programvaror nyttjas för tryckslagsberäkningar inom företaget?
5. Utförs uppdrag enbart som utredningar eller förekommer även utbildningsuppdrag?
6. Är det vanligen på initiativ av VA-huvudmannen som önskemål om trycklagsberäkningar efterfrågas eller utförs de efter rekommendation av konsulten?
7. I vilken fas kontaktas vanligen konsulter för tryckslagsbedömningar? Utredningsskede, projekteringsskede eller driftskede? Förekommer det att konsulter kontaktas efter skadliga tryckslag uppstått?

Erfarna VA-ingenjörer

1. Har du upplevt någon förändring i tryckslagsarbetet under ditt yrkesliv? Om ja, går det att härleda förändringar till vissa yttre omständigheter?
2. Upplever du att expertiskompetensen har förändrats under ditt yrkesliv?
3. Upplever du att den breda kompetensen har förändrats under yrkeslivet?
4. Vilka betydande tekniska förändringar har du sett under ditt yrkesliv som påverkat tryckslagsrisker?
5. Vilka tryckslagsåtgärder har genomförts och vilka erfarenheter finns kring dessa? Har det skett en förändring under yrkeslivet?
6. Har det erbjudits fortlöpande utbildningsmöjligheter i VA-branschen för tryckslagsrisker?
7. Har det skett någon förändring inom organisationerna hur man värderat specialistingenjörskompetenser? Finns dessa typer av kunskaper tillgängliga inom VA-organisationerna eller har de förflyttats till konsulter alternativt gått förlorade?
8. Har du exempel på allvarliga tryckslagsfall med betydande arbetsmiljömässiga risker? Antingen i Sverige eller globalt? Om ja, beskriv omständigheter så utförligt som möjligt.

Lärosäten

1. Erbjuder ni enskilda kurser inom tryckslag och hydrauliska transienter?
2. Har det tidigare erbjudits kurser inom tryckslag och hydrauliska transienter? Om ja, inom vilka ungefärliga årtal erbjöds de? Varför erbjuds de inte längre?
3. Berör ni tryckslag inom hydraulikkurserna på grund- och avancerad nivå? Om ja, i vilken ungefärlig omfattning?
4. Finns det andra ingenjörsinriktningar där enskilda kurser inom hydrauliska transienter erbjuds?

I samband med intervjuerna av VA-verksamheterna erbjöds en föreläsning, antingen i digital eller fysisk form, som behandlar grunderna i tryckslag. Föreläsningen har innefattat en genomgång av den fysikaliska bakgrunden till tryckslag, vilka konsekvenser tryckslag kan ha, vilka tryckslagsreducerande åtgärder som kan implementeras till ledningssystemet, samt vilket syfte respektive tryckslagsreducerande åtgärd har. Föreläsningen har även presenterat slutsatser från tidigare studier där arbetet med tryckslag utvärderats i landet.

3 Teoretisk beskrivning av tryckslag

Dimensionering av trycksatta ledningssystem utgår vanligen från ett på förhand definierat antal driftfall. Beräkningarna utgår då från stationära förhållanden, vilket definitionsmässigt innebär att driftförhållandet inte förändras över tid. Mellan två stationära förhållanden förekommer det en övergångsfas, som är ett instationärt förhållande, där en stationär beskrivning av strömningen inte är tillräcklig (Chaudry 2014). Instationära förhållanden initieras när ett stationärt tillstånd rubbas, antingen av en planerad eller oavsiktlig förändring. Fluktuerande tryckvågor skapas av den initierade hastighetsförändringen och fortplantar sig genom rörsystemet. Om skillnaden mellan de två driftsituationerna är stor samt övergången abrupt, innebärande en signifikant snabb hastighetsförändring, skapas tryckvågor med betydande över- och undertryck som fortplantas i rörsystemet. Detta fenomen kallas populärt för tryckslag, eller mer formellt ”hydrauliska transienter”.

Tryckvågorna transporteras genom systemet och reflekteras eller transmitteras vid exempelvis reservoarer, ventiler och förgreningar. Efterhand som tryckvågorna transporteras i ledningsnätet dämpas de av friktions- och punktförluster i systemet.

3.1 Fysikalisk konsekvens av tryckslag

Tryckslag riskerar att åsamka skador på ledningssystem. Vågrörelsen som uppstår till följd av tryckslagen reflekteras och transmitteras genom de olika delarna av ledningssystemet (förgreningar, reservoarer, ventiler etc.), med risk för okontrollerade tryckvariationer som följd. Tryckökningarna eller -minskningarna från tryckslaget adderas nämligen till det rådande stationära trycket i ledningssystemet.

En enskild våg kan uppnå skadliga magnituder, i synnerhet med rörmaterial som har hög våghastighet. Vågutbredningshastigheten (a) är beroende av rörens och den transporterade vätskans karakteristik (Jönsson & Svensson 1997):

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho_v}}{1+\frac{K \cdot D}{E \cdot e} \cdot C}} \qquad (1)$$

där K är bulkmodulen för vätskan, ρ_v är vätskans densitet, E är elasticitetsmodulen för rörmaterialet, D är rördiametern, e är rörets väggtjocklek och C är en konstant som beskriver hur röret är förankrat. För PE-ledningar ligger vågutbredningshastigheten i en storleksordning om 400 m/s (Wan & Mao 2016) medan för stålledningar ligger hastigheten kring 1 000 m/s (Bossermann & Hunt 2008).

Storleken på tryckförändringen (ΔH) som vågen skapar i relation till vågutbredningshastigheten (a) och hastighetsförändringen (Δv) ges av Joukouwski’s ekvation (Wylie & Streeter 1978):

$$\Delta H = \pm \frac{\Delta v \cdot a}{g} \qquad (2)$$

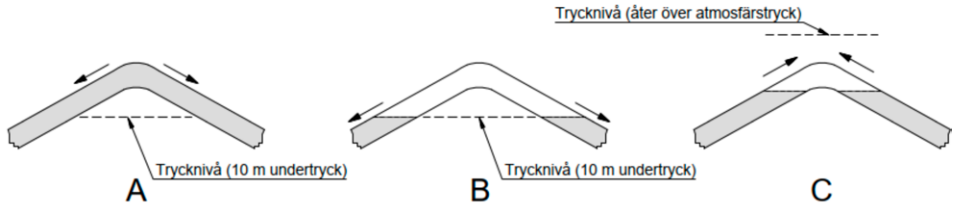
Joukouwski’s ekvation är tillämpbar för bedömning av både över- och undertryckets storlek. Ekvationen är lämplig att använda för en grov initial bedömning av tryckslagsriskerna. Ekvationen är konservativ då den utgår från en momentan hastighetsförändring

utan påverkan av reflekterande vågor, vilket innebär att trycket representerar ett högsta värde. Huruvida en hastighetsförändring är momentan eller inte ges av vågens reflektionstid som räknas ut enligt ekvation (3).

$$t = \frac{2L}{a} \tag{3}$$

Utförs stängningen snabbare än tiden t är stängningen att anse som momentan, dvs. tryckförändringen ges av ekvation (2). Utförs stängningen långsammare än t kommer reflekterande vågor att dämpa den totala tryckökningen eftersom den dynamiska energin stegvis reduceras. En rekommenderad schablon för stängningstiden uppges ligga kring 10–20 ggr reflektionstiden (Simpson 2019). Noteras ska att ventiler har olika ventilkarakteristik, samt att ingen betydande förändring av flödet sker innan ca 70–80 % av ventilens stängningsförlopp är utförd. Ovan angivna schablon bör därmed appliceras på de sista 20–30 % när ventilen börjar påverka flödesbilden. Samma försiktighet gäller även vid uppstart av pumpar och öppning av ventiler, med skillnad att det är första 20–30 % som ska regleras försiktigt.

Undertrycken som uppstår till följd av de negativa tryckvågorna riskerar också att skada ledningssystemet. Dels uppstår kavitationsbubblor, till följd av att vätskans ångbildningstryck understigs (förångning sker), som riskerar att implodera när de åter utsätts för ett statiskt tryck. Om undertrycket är långvarigt kan förångningen leda till ett fenomen kallat flödesseparation (Figur 3.1), innebärande att två eller flera flödesmassor separeras fullt ut, åtskilda av den förångade vätskan (Bergant et al. 2006).



Figur 3.1
Förlopp vid flödesseparation. A representerar när förångning uppstår på grund av det låga trycket vilket leder till separation av flödespelarna. B presenterar situationen när flödespelarna är delade och åtskilda av förångad vätska, medan C visar förloppet när trycknivån åter är över atmosfärstrycket och den förångade vätskan åter kondenserar.

De separerade flödesmassorna innehar fortfarande rörelseenergi, med riktning från varandra (Figur 3.1, B). Emellertid reflekteras flödesmassorna vid respektive änd- eller reflektionspunkter. När flödemassorna åter möts har de motriktade hastighetsriktningar, något som medför en förhöjd hastighetsdifferens, och tryckslagen ökar därmed ytterligare (Figur 3.1, C).

3.2 Orsak till tryckslag

Strömavbrott är ofta orsaken till de allvarligaste tryckslagsfallen som kan uppstå i ledningssystem. Strömavbrottet medför att strömförsörjningen till pumpmotorerna försvinner. Då det fortfarande finns rörelseenergi i pumphjul och pumpvätskan, kommer pumpen en kortare tid fortsätta att leverera flöde, tills denna energi avtagit och pumphjulet stannat alternativt att backventilen stängt (till följd av vändande flöde i pumpledningen). Denna period kallas pumpens utrullningstid och beror på hur det hydrauliska systemet är utformat samt på pumparnas tröghetsmoment. En lång utrullningstid är positiv för att lindra uppkomna tryckslag. Även start/stopp-drift av pumpstationer genererar liknande tryckslag som strömavbrott.

Snabb manövrering av ventiler är en annan orsak till uppkomna tryckslag. Många gånger härrör det till att en ventil stängs alternativt öppnas för snabbt av driftpersonal. Följden blir att flödet accelereras eller retarderas snabbt med kraftiga över- eller

undertryck som följd.

Abrupta förändringar av uttag är också en orsak till tryckslag. Exempelvis kan det, om industrier snabbt förändrar sitt uttag, generera tryckslag i ledningssystemet. Även öppning/stängning av spol-/brandposter vid påfyllnadsarbeten eller driftsättning av ledningar skapar tryckslag.

3.3 Tryckslagsreducerande åtgärder

Nedan sammanfattas ett antal tryckslagsreducerande åtgärder, som kan implementeras till ledningsnätet, med syfte att kort beskriva deras övergripande funktion samt fördelar och nackdelar. För mer ingående beskrivningar hänvisas till VAV P58 alternativt kurslitteratur från Chaudry (2014) eller Wylie och Streeter (1978). Speciellt Tabell 1 i VAV P58 beskriver de olika tryckslagsreducerande åtgärdernas fördelar respektive nackdelar väl.

3.3.1 Frekvensomriktare

Frekvensomriktare är en enhet som nyttjas för reglering av pumpmotorns hastighet. Även mjukstartare och -stoppare har likvärdig (men enklare) funktion och ger delvis samma fördelar som frekvensomriktaren. En frekvensomriktare nyttjas för att förlänga pumpars start- och stopptider, även kallat ramptider. Pumpstopp och -start kan då utföras mjukt innebärande att tryckvågorna minimeras då de reflekterar varandra. En frekvensomriktare gör nytta både på sug- och trycksidan om pumparna.

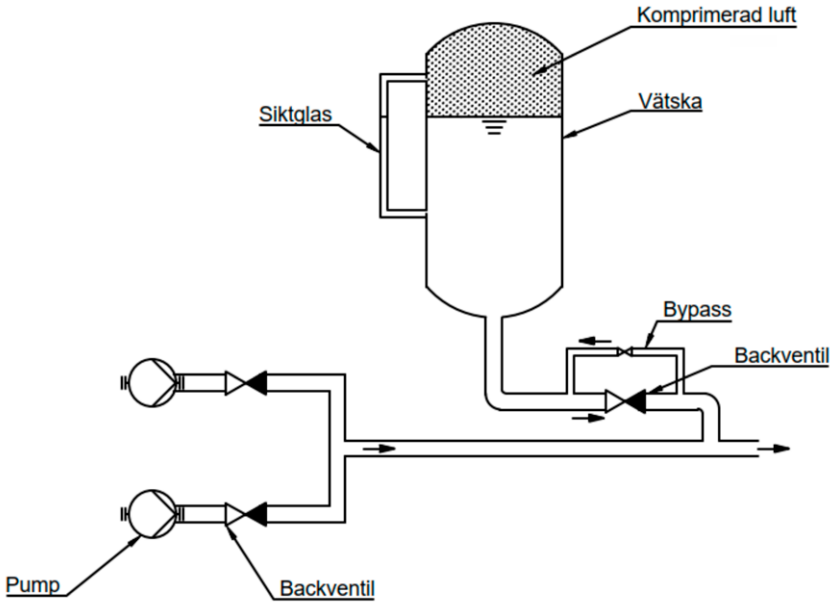
Figur 3.2
Frekvensomriktare för reglering av pumpars effekt.

En frekvensomriktare gör dessvärre ingen nytta vid strömavbrott eftersom den är beroende av ström. Då strömavbrott ofta är orsaken till den allvarligaste tryckslagssituationen för ett pumpsystem, kan en frekvensomriktare behöva kompletteras med ett annat tryckslagsskydd. För normaldrift är frekvensomriktaren emellertid mycket nyttig och minimerar tryckvariationerna i ledningsnätet, vilket reducerar risker för utmattning.

3.3.2 Tryckklocka

En tryckklocka är en innesluten tank delvis fylld med vatten och delvis med luft, där luften och vattnet antingen är i kontakt med varandra (hydrofor) eller separerade av

ett gummimembran (hydropress). Tryckklockan ansluts till det trycksatta ledningssystemet, oftast på utgående tryckledning efter pumparna (Figur 3.3). Vid normaldrift trycksätts tryckklockan genom att luften komprimeras till följd av det rådande trycket i det trycksatta systemet. Tryckklockan uppbär därmed samma tryck som pumparna tillför. När trycket i systemet faller, exempelvis vid pumpbortfall, övertar tryckklockan kortvarigt driften. I stället för det abrupta tryckfallet som uppstår när pumpen avstannar, klarar tryckklockan att förlänga tiden som trycket sjunker i systemet. Det innebär att samma allvarliga undertrycksvåg inte uppträder på trycksidan om pumparna. Tryckklockans fördelar är att det är ett mekaniskt skydd, helt oberoende av el och automation. Nackdelarna är ringa men en viss omsättningsproblematik kan uppstå till följd av stillastående vatten.



Figur 3.3
Utförande av tryckklocka med bypass-lösning på trycksidan av pumparna.

I många installationer används även tryckklockor som komplement till pumpar för att hantera små flödesuttag. Syftet är då att pumparna inte behöver starta vid varje mindre uttag utan tryckklockan uppbär en viss ”magasins”-kapacitet. Dessa tryckklockor har emellertid ingen betydande tryckslagsreducerande effekt.

3.3.3 Svänghjul

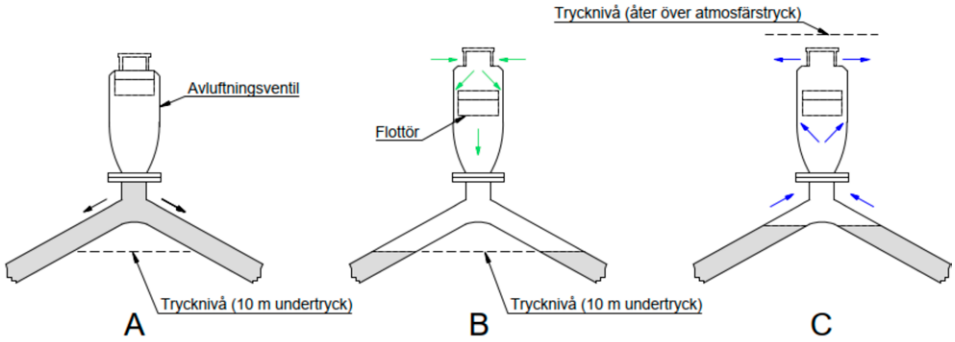
Ett externt svänghjuls syfte är att bibehålla rörelseenergi i pumphjulet under en längre tid, innebärande att pumpen inte stannar av lika snabbt. Svänghjulet är ett mekaniskt skydd som därmed fungerar även vid ett strömavbrott. Eftersom svänghjulet förlänger pumpens utrullningstid gör den nytta både på sug- och trycksidan om pumparna.

Nackdelen är att pumpar vanligen inte är förberedda för att på ett praktiskt sätt kunna kompletteras med ett externt svänghjul. Konsekvensen blir därmed att installationen blir lite av ett ”hemmabygge”. Även energimässigt är ett svänghjul något sämre eftersom det kräver mer tillförd motorenergi för att sätta hjulet i rörelse.

3.3.4 Avluftnings- och vakuumventil

Avluftningsventiler finns i olika utförande. Vanligtvis särskiljs de till tre olika grupper, nämligen enkelverkande (evakuerar luft), dubbelverkande (suger in och evakuerar luft) och vakuumventiler (suger in luft). För tryckslagsreduktion har enkelverkande ingen praktisk påverkan, utöver att det är positivt att ledningssystemet inte innehar ansamlade luftvolymer.

Både dubbelverkande avluftningsventiler och vakuumventiler kan emellertid nyttjas för tryckslagsreduktion. Ur tryckslagshänseende är deras huvudsyfte främst att motverka fenomenet flödesseparation (kortfattat beskrivet i avsnitt 3.1), men de bidrar även med att upprätthålla tryck i ledningssystemet vid uppkomna undertryckssituationer. Vid undertrycksförhållanden bidrar avluftningsventilen med att suga in luft (Figur 3.4, B), vilket upprätthåller ett lokalt atmosfärstryck vid avluftningsventilen. Därmed reduceras uppkomna undertryck i högpunkten, samt delvis längs övriga delar av ledningssträckan. När det hydrauliska trycket åter är i högpunkten evakueras luften i avluftningsventilen långsamt och kontrollerat, för att undvika en allvarlig krock av de separerade flödespelarna (Figur 3.4, C).



Figur 3.4
Förlopp för en dubbelverkande avluftningsventil vid tryckslagssituationer. Gröna pilar symboliserar att luft sugs in och blå pilar visar evakuering av luft.

Vakuumventilen har samma tryckslagsreducerande funktion som den dubbelverkande avluftningsventilen, men utan den automatiska evakueringen av luft, varefter luftevakueringen får utföras på ett manuellt och kontrollerat sätt efter tryckslagsförloppet.

Viktigt att poängtera är att en avluftningsventils flödeskarakteristik kan skilja mellan fabrikat. Avluftningsventiler med likvärdig anslutningsdimension kan alltså inneha olika förmågor att evakuera och släppa in luft. Avluftningsventilernas flödekarakteristik är därför viktig att beakta.

Nackdelen med avluftningsventiler är främst att en enhet tillförs ledningssystemet ute på ledningsnätet, där lokaliseringen inte alltid är praktiskt åtkomlig. För dricksvattensystem kan även insug av luft, eller i värsta fall ovidkommande vatten, medföra kvalitetsrisker.

3.3.5 Säkerhetsventil och sprängbleck

En säkerhetsventil är en ventil som öppnar och släpper ut vatten kontrollerat om ett förinställt tryck överstigs i ledningssystemet. Säkerhetsventiler används för att undvika att ledningens tryckklass överstigs vilket därmed förhindrar ledningsbrott. Placering av säkerhetsventiler är lämpligen vid en punkt där vatten kontrollerat kan bortledas till ett vattendrag eller dike.

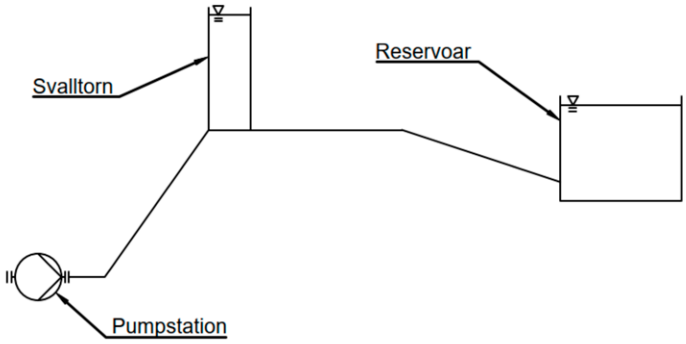
Säkerhetsventiler är i sig inte tryckslagsreducerande, utan en enhet som mildrar konsekvensen av tryckslaget. Ventilen nyttjas därmed normalt som komplement eller redundans till andra tryckslagslösningar.

Ett alternativ till säkerhetsventiler är sprängbleck. Det huvudsakliga syftet med ett sprängbleck är detsamma som en säkerhetsventil, men det som skiljer enheterna åt är att sprängbleck utgör en medveten försvagning av ledningssystemet i en utvald punkt. Syftet är därmed att ledningen i en krissituation ska brista vid sprängblecket då det på förhand är bedömt att vara den lämpligaste lokalisationen. Ett sprängbleck kompletteras normalt inte med bortledning av det utläckande vattnet.

3.3.6 Svalltorn

Ett svalltorn är en stor volym av vatten som placeras utmed ledningssträckan (Figur 3.5). Syftet med svalltornet är att etablera en reflektionspunkt för tryckvågor, varpå

svalltornets volym behöver vara tillräckligt stor för att fullt ut reflektera de uppkomna tryckvågorna. Uppstår ett undertryck på trycksidan av pumparna, till följd av ett pumpbortfall, kommer tryckvågen reflekteras i svalltornet och återgå till pumpstationen. Under pumparnas utrullningstid sker därmed fler reflekterande tryckvågor till pumpstationen, eftersom vågens periodtid (enligt ekvation 3) minskas. Det innebär att den dynamiska energin dämpas i fler steg och tryckslagets storlek reduceras, jämfört med om vågen behöver vandra hela vägen till systemets ändpunkt (slutreservoaren) för att därefter reflekteras. Ett svalltorn reducerar också flödesförändringen i ledningen då vattenvolymen i svalltornet kan tillföras ledningen.



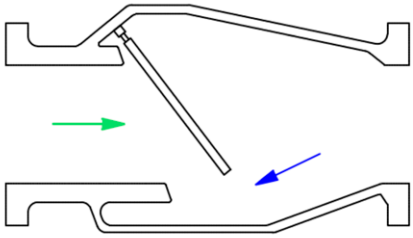
Figur 3.5
Exempel på utförande med svalltorn.

Nackdelen med svalltorn är att de ofta är dyra att bygga samt att de behöver vara väldigt höga för att bräddning inte ska uppstå vid normal pumpdrift. Dessutom riskerar vattenvolymen i svalltornet bli relativt dåligt omsatt vilket kan leda till kvalitetsbekymmer.

3.3.7 Backventil

Backventiler utnyttjas normalt på trycksidan om pumpar i trycksatta ledningssystem för att säkerhetsställa att backflöde inte uppstår vid avstängning av pumpar. Stängningen av backventilen kan emellertid orsaka backventilstryckslag.

En backventil får sin hydrauliska stängningssignal när trycket på trycksidan om backventilen överstiger trycket på sugsidan. Under tiden backventilen stänger flödar en del vatten ”fel håll” genom backventilen (Figur 3.6, blå pil). Beroende på stängningstid och typ av backventil varierar mängden flöde som rinner bakvägen. När ventilen slutligen stänger kommer det flödet omedelbart bromsas upp mot backventilens kula, klaff, kägla etc., varför ett tryckslag genereras. Ljudet som uppkommer vid en backventilsstängning är normalt sett inte ljudet från att klaffen slår i ventilens säte, utan snarare ljudet från det uppkomna tryckslaget (Ballun 2019).



Figur 3.6
Sprängskiss på stängningsförloppet för en klaffbackventil. Grön pil visar normala flödesriktningen genom backventilen medan blå pil visar flödesriktningen under backventilens stängningsförlopp.

Hantering av det uppkomna backflödet genom backventilen kan hanteras på två olika sätt. Det första innefattar installation av en backventil med så kort stängningstid som möjligt. Syftet är att backventilen ska hinna stänga innan ett substantiellt backflöde hinner uppträda. Ett reducerat backflöde medför att hastigheten genom backventilen blir lägre. Den relativa hastighetsskillnaden när ventilen stänger, enligt ekvation 2, blir därmed mindre eftersom en substantiell hastighet inte hunnit etableras. Det

efterkommande tryckslaget blir därmed dämpat. Exempel på ventiler med snabbstängande egenskaper är dysbackventiler och membranbackventiler.

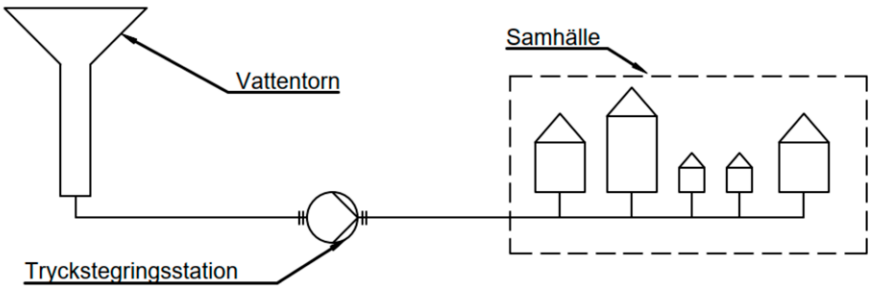
Den andra metoden är direkt motsatt ovanstående. Syftet är då att ha en backventil som stängs så långsamt som möjligt. I detta fall måste systemet kunna hantera att ett substantiellt backflöde får uppstå. Stängning av backventilen ska då liknas vid teorin för långsamstängning av avstängningsventiler, dvs. reducering av flödet ska ske långsamt. Backventilen utrustas då med en inre eller yttre egenskap som ökar trögheten av klaffen under stängningsförfarandet, innebärande att det uppkomna flödet reduceras lugnt och gradvis innan klaffen till slut stänger. Exempel på långsamstängande backventil är om den utrustas med hydraulisk oljebroms.

Beroende på utformning av de hydrauliska systemen behöver valet av backventil inte ha så stor betydelse med hänsyn till uppkomna tryckslag. Uppstår emellertid backventilstryckslag kan det åtgärdas enbart genom byte till en annan typ av backventil. Ballun (2019) har utfört jämförelser mellan olika typer av backventiler där det framkommit att vanliga klaff- och kulbackventiler generellt har de sämsta tryckslagsreducerande egenskaperna. Bakgrunden till detta är att de varken stänger snabbt eller långsamt, innebärande att ett substantiellt backflöde uppstår, men utan varsam stängning av backventilen.

3.3.8 Vattentorn

Ett vattentorn byggs främst inte med huvudsyfte att reducera tryckslag. Men finns ett vattentorn tillgängligt har det ofta positiv påverkan på tryckslagssituationen. Vattentorn har samma funktioner som ett svalltorn, men har ofta större volymer så de säkerhetsställer full reflektion ännu bättre än svalltornet. Vattentorn kan även säkerhetsställa en form av självtryck i överföringssystem.

Det finns många utföranden där vattentornets självtryck räcker för att försörja ett samhälle vid låga uttag. I situationer med höga uttag för samhället krävs det stöttning av en tryckstegringsstation som anläggs mellan vattentornet och samhället (Figur 3.7). Uppstår det ett strömavbrott i den tryckstegringsstationen, och det finns självtryck i systemet, kan vattentornet överta försörjningen om än med reducerat flöde. Den relativa flödesskillnaden (och därmed hastigheten, enligt ekvation 2) till följd av pumpavbrottet blir därmed lägre vilket reducerar tryckslagets storlek.

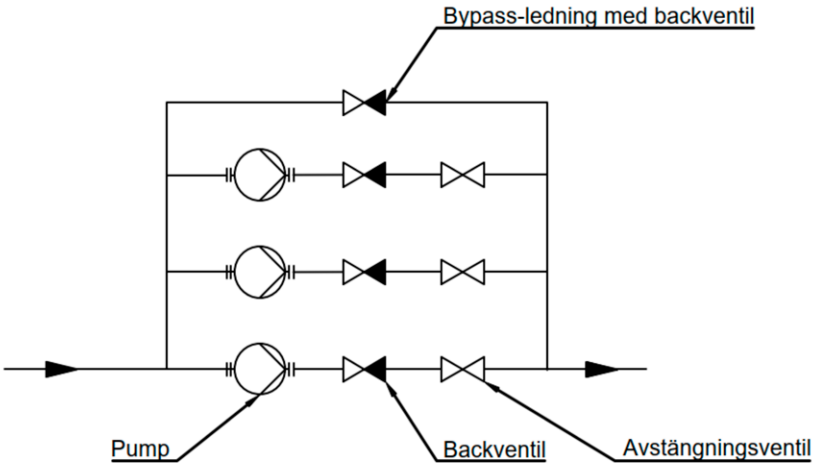


Figur 3.7
Exempel på utförande när en stöttande tryckstegringsstation anläggs mellan ett vattentorn och ett samhälle.

3.3.9 Bypass

En bypass innebär att en extra ledning anläggs från pumparnas sugsida till pumparnas trycksida (Figur 3.8). På denna ledning monteras en backventil för att undvika tillbakaströmning under normal pumpdrift. Syftet med en bypass är att begränsa flödesreduktionen som uppstår vid pumpavbrott i tryckstegringsstationen. Lösningen förutsätter att systemet har förutsättning för ett självtrycksflöde exempelvis genom att en uppströms tryckstegringsstation eller reservoar upprätthåller ett tryck på sugsidan. Bypassen möjliggör att ett visst flöde kan strömma förbi stationen varpå den relativa flödesskillnaden från systemet begränsas. En bypass lindrar tryckslag både på sug- och trycksidan om pumparna.

En bypass är i de flesta fall inte ett enskilt tryckslagsskydd, utan rekommenderas snarare användas i kombination med andra åtgärder.



Figur 3.8
Flödesschema genom en pumpstation med en bypass-ledning runt pumparna.

3.3.10 Batteribackup

Batteribackup (UPS) på pumpar är en lösning som förekommer (Figur 3.9). Syftet med batteribackupen är att förlänga pumparnas avstängningstid vid ett strömavbrott. Skyddet liknar till stor del ett externt svänghjul, men med skillnaden att ett batteri kortvarigt ska överta pumpdriften och långsamt stanna av pumpen. Robustheten i en lösning med en batteribackup har inte utvärderats inom studien, men osäkerheter föreligger kring om tillräcklig redundans kan byggas in i ett batteri eller om det finns risk att batteriet inte fungerar vid tryckslagsfallet.

Figur 3.9
Batteribackup som kan nyttjas för att kortvarigt överta pumparnas strömförsörjning vid nätavbrott.

3.4 Ledningsbelastning

Efter att ledningarna är anlagda utsätts de för olika typer av belastningar som kan försvaga rören och reducera deras hållfasthet. Belastningar som rören utsätts för kan indelas i yttre och inre belastningar.

Yttre belastningar

Yttre belastningar på VA-ledningar avser påfrestningar eller påverkan från faktorer utanför ledningssystemet som kan påverka dess struktur och hållbarhet. En sammanställning av de främsta faktorerna som har en inverkan på de vanligaste materialen och produkttyper vid nyanläggning har sammanställts av Malm et al. (2011). Exempel på yttre belastningar innefattar yttre tryck, antingen från jord, trafik eller grundvatten, korrosivitet i omkringliggande jord eller vibrationer från närliggande grävarbeten. En ledning kan också vara försvagad till följd av undermålig ledningsförläggning eller oförsiktig återfyllning av schaktmassor.

När en ledning väl är förlagd är det svårt att påverka de yttre faktorerna, utan betydande schaktarbeten med tillhörande kostnader.

Inre belastning

Inre belastningar på trycksatta VA-ledningar avser påfrestningar eller påverkan från faktorer inuti rören som kan påverka dess struktur eller hållbarhet.

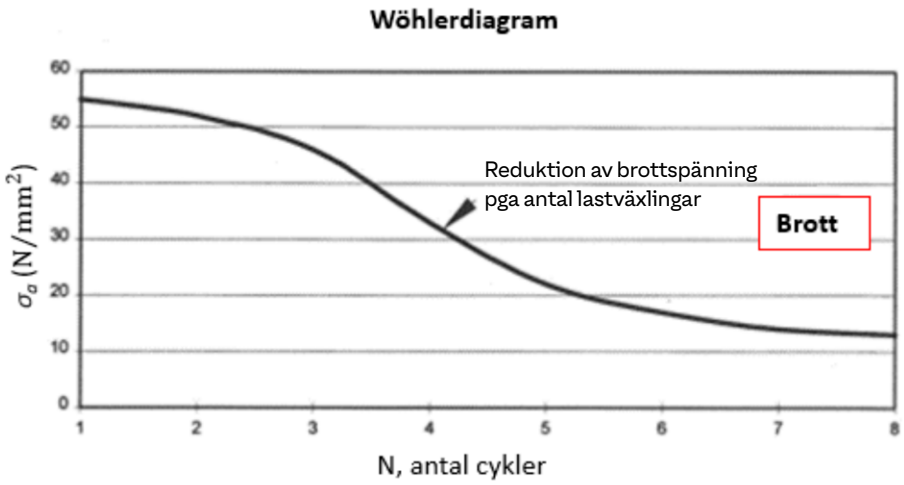
De vanligaste inre belastningarna på ledningsnätet är tryckförändringarna och tryckslagen som genereras från vattnet inuti ledningen, vilket kan påverka ledningsnätets hållfasthet och stabilitet. Kraftiga övertryck kan generera risk för sprängning av rör, medan kraftiga undertryck riskerar rörimplosion eller buckling (VAV 1995). Återkommande tryckslag som uppstår i ledningar kan även medföra utmattningsbrott då rörmaterialet upprepade gånger blir utsatt för varierande spänningar.

Metalliska material kan även utsättas för invändig korrosion som kan leda till att det uppstår avlagringar på rörväggen, med reducerad tvärsnittsarea som följd. Invändig korrosionen uppstår som en följd av vattnets alkalinitet och syrehalt i kombination med egenskaperna hos det material som dricksvattnet kommer i kontakt med. Även mikrobiologisk tillväxt i ledningar kan orsaka biofilmsbildning som kan inducera korrosion (Svenskt Vatten 2021).

Utmattningssyndrom

Diffusa läckor brukar tillskrivas situationen där det vid skadetillfället kan vara svårt att peka ut någon särskild orsak till läckan och där inga yttre skador på röret kan identifieras. Dessa diffusa läckor kan ibland tillskrivas återkommande tryckvariationer till följd av pumparnas driftsätt i trycksatta ledningssystem. Kontinuerliga tryckvariationer som uppkommer dagligen, år efter år kan tänkas påverka ett ledningssystems tålighet och i förlängningen leda till utmattningsbrott.

Utmattning av rörmaterialets hållfasthet orsakas av upprepade mekaniska spänningar. Vid utmattning påverkas rörets plasticitet (deformerbarhet) och dess sträckgräns. Ett materials förmåga att motstå utmattning kallas utmattningshållfasthet. En lednings tålighet kan illustreras av ett Wöhler-diagram som visar utmattningsspänningen (amplitudspänningen) σ_a i förhållande till livslängden i cykler N (Figur 3.10) (Büchert & Svensson 1998).



Figur 3.10
Ett Wöhlerdiagram som beskriver ledningsmaterialets förmåga att motstå utmattning.

När en ledning väl är anlagd är det svårt att påverka de yttre belastningarna som rören utsätts för. Den inre korrosionen är också svår att påverka då den beror av vattnets kemiska egenskaper. Något som emellertid går att påverka är omfattningen av tryck-variationer som uppstår inne i röret genom ett optimera driftbeteendet, då frekvensen och storleken på tryckslagen påverkas av hur snabba flödesförändringar som utförs i ledningssystemet. Att undvika kraftiga tryckslag genom att säkerhetsställa att åtgärder finns som begränsar maximala över- och undertryck är en viktig faktor. Många gånger kan ett kraftigt tryckslag vara den slutgiltiga orsaken till att en ledning spricker. Även för utmattade ledningar, där hållfastheten försämrats av andra orsaker, kan det finnas situationer där ledningen håller lite längre om kraftiga tryckvågor kan undvikas.

4 Historisk utveckling av tryckslag i Sverige

En litteraturstudie visar att flertalet tryckslagsrapporter inom Sverige utarbetades under perioden 1980–2010 (Tabell 4.1). Sammanställningen har utgått från litteratur utgiven i Sverige och med koppling till VA-system.

Tabell 4.1
Utarbetade tryckslagsrapporter i Sverige.

Titel	Författare	Årtal
Tryckslag – ett praktikfall	L Ekfjorden, B A Gustafson	1978
Tryckslag i pumpanläggningar, kurskompendium	B A Gustafson	1979
Tryckslag i rörledningar – Kompendium för V4	A Sjöberg	1980
Tryckslagsproblematik i VA-ledningar	L Jönsson	1980
Fluida transienter, kurskompendium	B A Gustafson	1981
Beräkning av tryckslag med datormodellen WATHAM	V Arvidsson	1983
Pressure transients in an asbestos-cement sewage water conduit – Bjärnum	L Jönsson	1984
Pressure transients in very short conduits	L Jönsson	1984
Pressure transients in a PVC-conduit – Eslöv	L Jönsson	1984
Pressure transients in PVC sewage conduits transfer scheme Skurup-Ystad	L Jönsson	1984
Pressure transients in a sewage conduit with check valve and the influence of pump sump level	L Jönsson	1984
Trycktransienter i PVC-ledning för avloppsvatten – Allerum	L Jönsson	1984
Pressure transients in a PVC-sewage conduit – Åhus	L Jönsson	1984
Trycktransientmätningar i renvattenledning – Almaån	L Jönsson	1984
Trycktransienters inverkan på VA-ledningar	M Larson, L Jönsson	1985
Ett datorprogram for tryckslagsberäkningar	B-M Dahlberg	1988
VAV P58 – Tryckslag i VA-anläggningar	B Persson	1988
Ger tryckslag upphov till vattenskador? Laboratorieprov av tryckslags inverkan på rörkopplingar	L Waldner	1990
Kompendium i fluida transienter, turbomaskiner	B A Gustafson	1994
Tryckslag i tappvattensystem	P Ekström	1996
Läcksökning med hjälp av tryckslagsmätningar – transientmetoden	L Jönsson, A Svensson	1997
Tryckslag i vattenledningsnät – några exempel	J Spännare	1998
Tryckslags inverkan på vattenledningsnät	J Büchert, A Svensson	1998
Computations of hydraulic transients in raw water pipeline feeding a water treatment plant	L Jönsson	2000
Hydraulic transients in a pipeline with a leak	L Jönsson	2001
Pressure pulsation problems in a sewage water pumping station with a self-evacuating, centrifugal pump	L Jönsson	2002
The effect of a gas pocket in a pipeline on hydraulic transients – computer study	L Jönsson	2002
Measurements of hydraulic transients in sewage water pumping stations – analysis, wave propagation velocities	L Jönsson	2003
Analys av tryckslag i rörsystem	G Rasmusson	2006
Hydraulic transient in a pipeline	M Elbashir, S Amoah	2007

4.1 Slutsatser från kartläggning år 1980

Jönsson (1980) utförde en undersökning om tryckslagsproblem i kommunala VA-ledningar i Sverige. Metodiken för studien utgjordes av en inventering i landet där ett frågeformulär skickats till 125 kommuner varav 33 besvarade undersökningen. Dessutom kontaktades ett antal konsulter för att få deras erfarenhetsåterkoppling gällande tryckslag, använda beräkningsmetoder samt behov av vidare insatser för förbättring av möjligheterna att förutsäga tryckslag i VA-ledningar. En litteraturstudie kring teori bakom tryckslagsberäkningar gjordes också för att värdera befintliga beräkningsmetoder.

Rapporten avsåg att undersöka följande problemformuleringar:

- Vilken är omfattningen av tryckslagsrelaterade problem samt vilka typer av problem förekommer i befintliga ledningar?
- Hur har man vid projektering eller vid andra tillfällen tagit hänsyn till tryckslag i VA-ledningarna?
- Vilka möjligheter finns det att göra beräkningar på olika typer av tryckslagsförlopp som kan förekomma i VA-system?

Den genomförda studien över tryckslagsproblem i VA-ledningar ledde fram till en rad slutsatser. 13 av 33 kommuner rapporterade skador på rör och rörarmatur förorsakade av tryckslag. De skador som hade identifierats var spräckta rör på grund av övertryck (betong-, asfalt-, cement- och gjutjärnsrör) eller undertryck (plaströr), skador på back- och avluftningsventiler, skador på vattenmätare och läckande fogar. I många fall hade skadorna uppkommit upprepade gånger. Upphov till skador orsakade av tryckslag kunde härröras till två kategorier: dels de som genererats av flödesförändringar orsakade av start och/eller stopp av pumpar vilket åtta kommuner rapporterade om, dels de som orsakats av ventilmanövreringar vilket fyra kommuner rapporterade om.

Skadeomfattningen bedömdes vara betydligt större i verkligheten än vad som framgick i undersökningen. Det kan ha berott på flera faktorer, dels då skadeorsaken ibland kan vara svåridentifierad, dels på grund av en kunskapsbegränsning bland driftpersonalen. Dokumentationen kring skador orsakade av tryckslag var i många fall knapphändig vilket försvårade analys av tryckslagsförlopp då flödesförhållandena vid skadetillfället ej var kända.

Det framkom att det, vid dimensionering av VA-ledningar, inte fanns något enhetligt tillvägagångssätt för hantering av tryckslagsproblematik. Från konsulter framkom önskemål om kostnadseffektiva datorprogram för beräkning av tryckslagsförlopp i mer komplicerade rörsystem. 1980 fanns beräkningsprogram tillgängliga som möjliggjorde enklare beräkningar, men vid komplicerade faktorer såsom ångbildning, gasutlösning och luftfickor saknades beräkningsmöjligheter. Från merparten av de medverkande i undersökningen framfördes det även önskemål om validering av beräkningsmodellers tillförlitlighet mot uppmätta tryckslag i ledningsnäten.

Det fanns en stor efterfrågan om vikten av att sprida kunskap om tryckslagsfenomen till konsulter och kommuner. Som en del av detta behov var det önskvärt att utveckla en handbok på svenska om tryckslag. Handboken skulle inkludera tumregler och/eller diagram som möjliggör en snabb och översiktlig bedömning av tryckslagsrisker. En sådan resurs skulle inte bara öka förståelsen för tryckslagsfenomenet utan också fungera som ett praktiskt verktyg för att underlätta bedömningen och hanteringen av potentiella risker.

Jönsson (1980) fann också att flera ansatser gjorts till att beakta de mer komplicerade faktorerna. Ansatsernas tillämplighet har varit begränsad då de förutsätter specifika numeriska värden för nya parametrar, såsom kavitationskärnor, den relativa hastigheten mellan luftbubblor och vatten, samt den initiala deformationen hos rör. Emellertid fanns det en bristande kunskap om realistiska värden för dessa parametrar i olika situationer. Sammantaget pekade dessa begränsningar på relevansen av ett fortsatt arbete

med att försöka hitta ovannämnda parametrar då dessa kan ha en väsentlig inverkan på tryckslagsförlopp.

4.2 Intervju med erfarna personer

Inom rådande studie intervjuades ett antal nyckelpersoner med gedigen kunskap inom hydraulik och lång arbetslivserfarenhet inom VA-branschen. Syftet var att ge en bild av hur arbetet med tryckslag utvecklats sedan 1980. Urvalet av nyckelpersoner utfördes i samråd med projektets referensgrupp och mynnade ut i följande personer:

- Gilbert Svensson, Vattenforum
- Olle Ljunggren, Göteborgs Stad Kretslopp och Vatten
- Lennart Jönsson, Lunds tekniska högskola
- Bernt Persson, Göteborgs Stad Kretslopp och Vatten

Svar från de intervjuade sammanfattas gemensamt. De intervjuade poängterade att de uppgivna svaren utgick från deras upplevelse av branschen och är inte källkritiskt granskade. Svaren ska dock anses som relevanta, men inte som entydiga fakta.

Samtliga svar vittnar om att arbetet med tryckslag inte förändrats nämnvärt under deras yrkesliv utan har generellt alltid varit väldigt lågt. Detta beror främst på att kompetensen kring tryckslag i branschen också varit marginell och att det endast funnits ett begränsat antal personer eller konsultfirmor att vända sig till. Någon uppger även att man bedömer att kunskapen kontinuerligt försämrats. Den upplevelsen gäller inte bara kunskapen inom tryckslag utan även att den allmänna kunskapen i klassisk hydraulik och rörströmning också kraftigt reducerats i branschen, både hos VA-huvudmännen och konsulterna.

De kunskapsuppsving som förekommit kring tryckslag har främst kopplats till enskilda personers intresse och engagemang för fenomenet. Ofta har de personerna, inom sin specialistkompetens, varit relativt ensamma och en övergripande samverkan i landet har saknats. Att utveckla sin specialistkompetens har också varit utmanande. Dels för att det finns få personer att diskutera med, dels för att det är svårt att erhålla underlag för tryckslagsanalyser då data är svårtillgängliga.

Kunskapsläget hos VA-ingenjörer upplevs följa samma trend som ovan och är lågt. Någon uppger även att kunskapen möjligen försämrats. Införlivandet av modelleringsprogram har möjligen reducerat den grundläggande förståelsen av hydraulik, vilket kan ha bidragit till det försämrade kunskapsläget då beräkningar enklare kan utföras utan ingående kunskap om de styrande ekvationerna. Inom driftenheter uppges det att förståelsen för ”att man ska vara försiktig när man stänger” funnits, men förmågan att kvantifiera stängningshastigheter på pumpar och ventiler, samt resulterande storlek på tryckslagen har saknats.

Bland de tekniska förändringar som bidragit till förbättrade tryckslagsförhållanden nämns frekvensomriktare och mjukstängning och -start specifikt. Implementerandet av dessa har medfört betydligt bättre driftbeteenden och mängden hastiga flödesförändringar i ledningssystemen har reducerats, vilket mildrat tryckbelastningar på ledningssystemen. Även förekomst av backventiler nedströms pumpar, samt utvecklingen av snabbstängande backventiler har haft en god inverkan på ledningssystemen.

Utvecklingen av datorers prestanda och enskilda tryckslagsprogram har också möjliggjort att tryckslagsberäkningar kan utföras med större noggrannhet än tidigare, när manuella (grafiska) metoder nyttjades. Tryckslagsberäkningar utgår huvudsakligen från numeriska beräkningsmetoder, vilket manuellt är tidskrävande. Förbättringen av datorers prestanda har således resulterat i att komplexare system kan utvärderas. Slutligen har även möjligheten till tryckmätning förbättrats med utveckling av än mer högupplösta tryckgivare.

Utbildningsmöjligheter utanför akademin har förekommit. Internt i Göteborg erbjöds utbildningar på 1980 och 1990-talen till projekt- och driftenheterna med syfte att ge en grundläggande förståelse för tryckslagsfenomenet. På 1970 och 1980-talen utgav STF Ingenjörsutbildning kurser inom VA-hydraulik där tryckslag berördes. Gruppen veterligen gavs inga kurser av Svenskt Vatten, men någon enskild rekommenderade att det bör erbjudas. Inom akademien uppger de intervjuade att undervisning erbjöds tidigare, främst genom Bror Arne Gustafsson och Anders Sjöberg på Chalmers och Lennart Jönsson på Lunds tekniska högskola. Ingen av dem är längre aktiva i arbetslivet.

En viss kännedom fanns om allvarligare uppkomna tryckslagshändelser inom landet.

- I Göteborg uppstod ett tryckslag där en pump flög ut ur ett ledningssystem till följd av ett strömavbrott och ett efterföljande backventilstryckslag. Pumpen slog in i en vägg ett par meter bort.
- Ett annat fall i Göteborg avsåg även det ett backventilstryckslag. Backventilen var sedan tidigare tagen ur drift och låst i öppet läge, då tryckstegringspumparna tidigare tagits ur drift. En läcka uppstod ca 1 km bort från backventilen när en ø800-ledning underminerades av ett häftigt skyfall. Det utökade ”uttaget” skapade initialt ett undertryck vid backventilen innan tryckvågorna reflekterades i ledningsnätet och återvände som en övertrycksvåg. När vågen nådde backventilen släppte låsningen och klaffen stängde abrupt vilket initierade ett allvarligt backventilstryckslag som genererade fyra rörbrott. Följdeffekterna blev att vattnet letade sig ut på vägnätet och delvis började underminera slänter vid en bro, samt att ett antal abonnenter blev utan vatten (Göteborgsposten 1982).
- I Skåne fanns ett exempel på ett större överföringssystem till Malmö där ledningssystemets kapacitet utnyttjades maximalt i samband med att en automatisk avstängningsventil stängde för snabbt till följd av ett automationsfel. En övertrycksvåg genererades tillbaka i ledningssystemet och nådde ett uppåtriktat T-rör. Tryckvågen sköt loss flänsen på T-röret och en stor vattenpelare sprutade upp i marknivå. Utvärderingar i efterhand visade att ventilen stängdes linjärt på ca 600 s, vilket gav en effektiv stängningstid (tiden då ventilen faktiskt gör en flödesförändring) på ca 200 s, vilket motsvarade ca 3–4 ggr vågens reflektionstid (2*L/a). Tryckvågen bedömdes därmed ha en amplitud om ca 175 mvp vid T-röret. Efter händelsen ändrades ventilens stängningsförlopp till ett mjukare förlopp där en längre effektiv stängningstid nyttjades.

Sammanfattningsvis uppgavs det att tryckslag alltid ansetts som ”lite mystiskt” och något man inte får fullständigt grepp om. Man har haft kännedom om fenomenets existens, men att det ändå är ett problem som gått lite under radarn. De intervjuade upplevde att tryckslagsfrågan ofta glömts bort vid projektering. Ledningsbrott har emellertid förekommit där stark misstanke föreligger kring att tryckslag är orsaken. För de flesta fallen har det dessvärre varit svårt att verifiera att tryckslag var den faktiska orsaken.

5 Utbildning om tryckslag på lärosäten

En förutsättning för ett bra kunskapsläge inom hydraulik och tryckslag är att det erbjuds goda utbildningsmöjligheter. Tryckslag är ett specialiserat område med en förhållandevis komplicerad teori, varför det kräver förkunskaper inom hydraulik. Det krävs därmed att utbildning erbjuds genom fortsättningskurser inom strömningslära.

För att kartlägga vilka utbildningsmöjligheter det finns på de större tekniska högskolorna och universiteten i landet skickades en enkät ut till kursansvariga för VA-kurserna på de stora lärosätena. Personal med inriktning mot maskin- och industriutbildningar har exkluderats. Emellertid har det i enkäten ingått en fråga kring om den svarande har kännedom om ifall tryckslagsutbildning erbjuds inom andra avdelningar på respektive lärosäte.

Tabell 5.1
Kursutbud inom tryckslag på de större svenska lärosätena.

Lärosäte	Kurser erbjuds	Kurser har erbjudits	Delmoment i kurs	Erbjuds i andra ingenjörsinriktningar
Lunds tekniska högskola	Nej	Ja (1975–1990-talet)	Ja (2 h föreläsning, 2 h övning)	Möjligen maskin
Uppsala universitet	Nej	Nej	Nej	Nej
Kungliga tekniska högskolan	Nej	Vet ej	Ja (4 h föreläsning, 2 h övning)	Nej
Linköpings tekniska högskola	Nej	Del av kurs (4 hp)	Ja 0,5 hp	Nej
Chalmers tekniska högskola	Nej	Ja (1990-talet)	Nej	Möjligen maskin eller skeppsbyggnad
Luleå tekniska universitet	Nej	Nej	Nej	Möjligen maskin

Sammanställningen visar på ett entydigt resultat kring att utbildningsmöjligheterna inom tryckslag numera är mycket små, på gränsen till obefintliga. Inget lärosäte uppger att de erbjuder kurser inom tryckslag och instationära strömningsförhållanden. Några lärosäten erbjuder en introduktion till tryckslag genom i bästa fall en föreläsning och en övning, men därefter ingen vidare undervisning. De svarande uppgav också att de inte hade kännedom om ifall det fanns bättre utbildningsmöjligheter inom tryckslag inom andra ingenjörsutbildningar, men att fenomenet eventuellt nämns inom maskinrelaterade utbildningar.

Hälften av lärosätena återkopplar att utbudet var bättre för ca 30 år sedan och att man då hade större fokus på tryckslag. Enbart ett svar inkom som belyste orsaken kring varför kursen inte längre erbjuds, nämligen att kursen ”*ansågs relativt specialiserad*” och ”*andra ämnen bedömdes vara mer attraktiva för studenterna*”.

Nedanstående citat framkom från en professor i ett enkätsvar.
”Kunskap och kompetens beträffande området bedöms vara låg inom branschen. Även vad gäller akademien är det få personer som har arbetat med sådana problem och kan ämnet. Framtida pensionsavgångar kommer förvärra situationen inom akademien och mer fokus på området krävs för att säkerställa en rimlig kunskapsnivå. Ett sådant fokus omfattar också kunskapsspridning till branschen.”

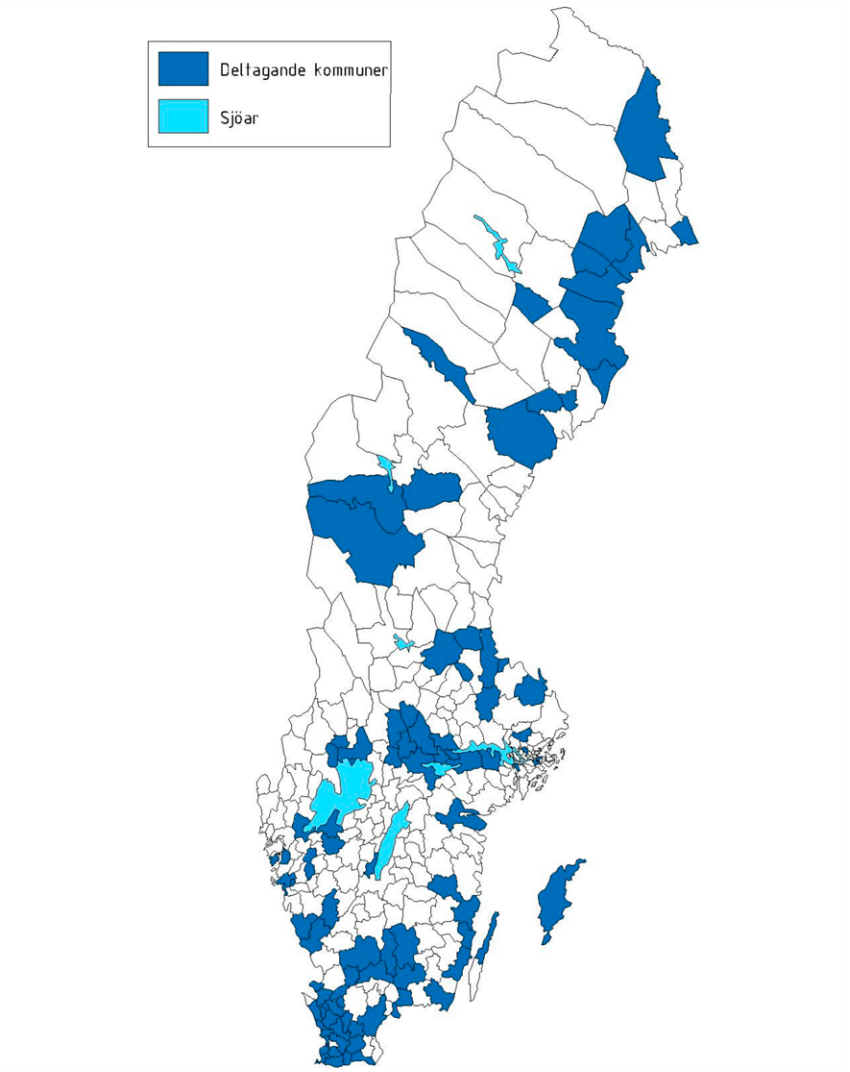
6 Tryckslag hos VA-huvudmännen

I syfte att utvärdera hur utbrett arbetet med tryckslag är hos VA-verksamheterna genomfördes en enkätstudie. Tabell 6.1 presenterar de VA-verksamheter som bidrog med svar till studien.

Tabell 6.1
Deltagande VA-verksamheter i studien.

Alingsås	Kävlinge	Svedala
Alvesta	Lidköping	Svenljunga
Bergslagens kommunalteknik	Ljungby	Sydvatten
Boden	Lumire	Sölvesborg
Borgholm	Malå	Tingsryd
Dorotea	Markaryd	Tjörn
ESEM	Mittskåne vatten	Trelleborg
Falun	MIVA	VA SYD
Göteborgs Stad Kretslopp och Vatten	Mönsterås	Vara
Gotland	NODRA	Vatten och Miljöresurs
Grums	NSVA	Vellinge
Gästrike Vatten	NVOA	VEMAB
Habo	Oskarshamn	VIVAB
Hammarö	Pajala	Västra Mälardalens Energi & Miljö
Haparanda	Partille	Vänersborg
Heby	PIREVA	Vännäs/Bjurholm
Kalmar	Robertsfors	Växjö
Karlshamn	Salem	Ystad
Karlskoga	Sigtuna	Älmhult
Karlskrona	Sjöbo	Älvsbyn
Karlstad	Skellefteå	Ängelholm
Kil	Skurup	Örebro
Klippan	Sollentuna Energi och Miljö	
Kristianstad	Stenungsund	

Totalt deltog 96 kommuner i studien antingen direkt eller indirekt via ett interkommunalt VA-bolag. Den geografiska spridningen av deltagande kommuner sammanfattas i Figur 6.1.



Figur 6.1
Geografisk utbredning av deltagande kommuner i studien.

Flera av de tillfrågade upplevde att det var svårt att svara på frågorna då det fanns knapphändig dokumentation, varför flera svar utgår från personalens erfarenhet och i enskilda fall från vad ”man hört” i korridorerna, i synnerhet de frågor som avser historiska händelser och bekymmer som uppkommit i ledningsnäten. Enskilda svar upplevdes också som ”framstressade”, innebärande att svaren möjligen inte genomsyrade hela organisationen. Denna andel bedömdes emellertid låg, varför de inte bedöms påverka totalresultaten.

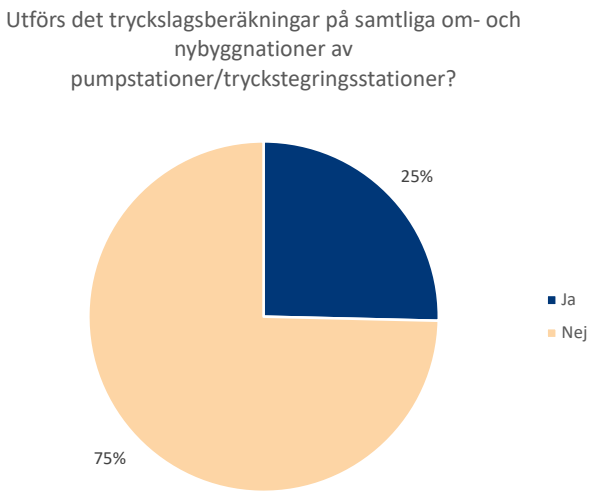
6.1 Förebyggande arbete med tryckslag

Ett proaktivt arbete kring tryckslag kan reducera risken för att oväntade tryckslagsfenomen uppstår i ledningsnäten. En viktig del av det förebyggande arbetet är att risker för tryckslag utvärderas vid nybyggnation eller ombyggnation av ledningar. Utförs en ombyggnation av det befintliga ledningsnätet, utan en hydraulisk kapacitetsförändring, kan erfarenheten och kunskapen om det befintliga systemet ofta vara tillräcklig. I de fall dimensionerande flöden utökas, med ökade hastigheter i ledningsnäten som följd, bör tryckslagsrisker omvärderas och kvantifieras. Detsamma gäller vid anläggning av nya ledningssegment. I synnerhet vid anläggning av nya överföringsledningar för vatten eller spillvatten är det väsentligt att tryckslag på förhand utvärderas. I situationer där

tryckslagsreducerande åtgärder ersätts eller förändras bör även en uppdaterad riskanalys med tillhörande beräkning utföras.

En tryckslagsutvärdering kräver nödvändigtvis inte avancerade beräkningar i tryckslagsprogram. En erfarenhetsmässig värdering kombinerat med nyttjande av ekvation 2 (avsnitt 3.1), kan i flertalet fall vara tillräckligt. Visar bedömningen att moderata risker förekommer behöver avancerade tryckslagsberäkningar inte utföras. Föreligger det emellertid någon osäkerhet rekommenderas mer ingående bedömningar. I den totala projektkostnaden är ofta kostnaden för en tryckslagsutredning marginell och utförande av tryckslagsberäkningar kan ses som en försäkring som kraftigt reducerar risken för att allvarliga konsekvenser ska uppstå. Oavsett utvärderingsnivå är det viktigt att bedömningen dokumenteras.

Inom studien utvärderades hur vanligt det är att tryckslagsberäkningar utförs. Figur 6.2 presenterar hur många kommuner som utvärderar tryckslag vid ny- och ombyggnationer av pumpstationer eller tryckstegringsstationer.



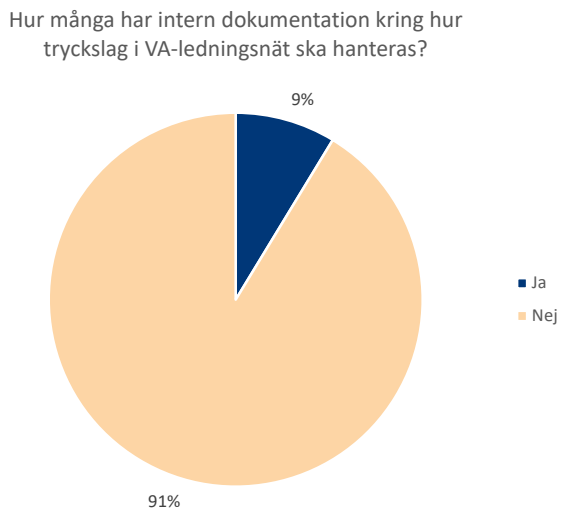
Figur 6.2
Andelen verksamheter som utfört tryckslagsbedömningar på samtliga ny- och ombyggnationer av VA-stationer.

Figur 6.2 visar tydligt att de flesta verksamheter inte utvärderar tryckslag vid byggnation av nya VA-stationer eller betydande ombyggnationer av sådana. Några svarande uppgav att det vid enstaka tillfällen utförts beräkningar, men de flesta uppgav att det aldrig utförs. I fallen där beräkningar utförs härrör det ofta till att enskilda projektledare eller konsulter innehar tillräcklig erfarenhet och kompetens att lyfta frågan om tryckslag.

Några enskilda svar uppger att frekvensstyrning har implementerats vid VA-anläggningarna med motiv att det eliminerar tryckslagsrisken. Frekvensomriktare är en utomordentlig åtgärd som minskar kraftiga svängningar i ledningssystem, men det är viktigt att tillägga att frekvensomriktare slås ut vid strömavbrott, vilket normalt är den situation som ger störst risk för tryckslag. Det bör därmed säkerhetsställas att allvarliga skador inte uppstår även för fallet när frekvensomriktarna är ur drift.

Dokumentation

På frågan som berör hur många som har interna riktlinjer eller dokument som tydliggör om tryckslagsberäkningar behöver utföras på en övergripande nivå eller avancerad nivå, uppger nästan samtliga att det saknas. De flesta återkopplar att det helt saknas dokumentation som berör tryckslag. Figur 6.3 presenterar andelen som har intern dokumentation kring hantering av tryckslag.



Figur 6.3
Andelen VA-verksamheter som innehar intern dokumentation kring hantering av tryckslag.

Endast fyra organisationer berör tryckslag i interna styrdokument. Två svaranden uppger inte på vilket sätt tryckslag berörs. En uppger en riktlinje i sin tekniska standard som föreskriver:

”Tryckslagsberäkningar normalt inte behöver utföras med hastigheter understigande 1,0 m/s.”

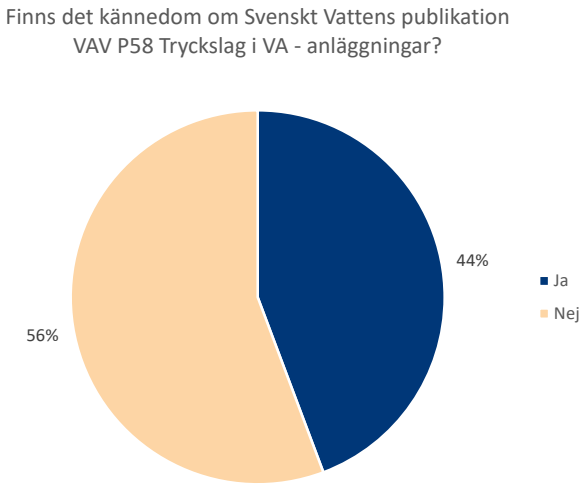
Den andra föreskriver:

”Tryckslagsberäkningar alltid bör utföras på långa(?) rörledningar för att säkerställa att inga skadliga tryck kan uppstå i ledningen samt avgöra vilket skydd som är lämpligt.”

Det tydliggörs emellertid inte vad som inbegrips inom ”långa”. Vad gäller hastighetsriktlinjen i det första citatet är det en god tanke, men för längre ledningar ökar riskerna med tryckslag varpå det oavsett hastighet bör beaktas. Bakgrunden till valet av 1,0 m/s var inte känt av organisationens representant. Oavsett innehåll i riktlinjen är det positivt att det föranleder att tryckslagfrågan åtminstone lyfts.

Bland övriga organisationer uppges det att riktlinjer saknas. Många förlitar sig på att konsulter har förmåga att värdera behovet av beräkningar, medan andra hänvisar till att respektive projektledares kunskap och erfarenhet avgör om tryckslag behöver beaktas eller inte.

Flera svarande uppger att de önskat en branschgemensam standard som tydliggjort om tryckslagsberäkningar behöver utföras eller inte. En branschgemensam publikation kring tryckslag utarbetades i slutet av 80-talet, nämligen *VAV P58 – Tryckslag i VA-anläggningar* (VAV 1988). En av frågorna berörde om det finns kännedom om denna publikation hos verksamheterna (Figur 6.4).



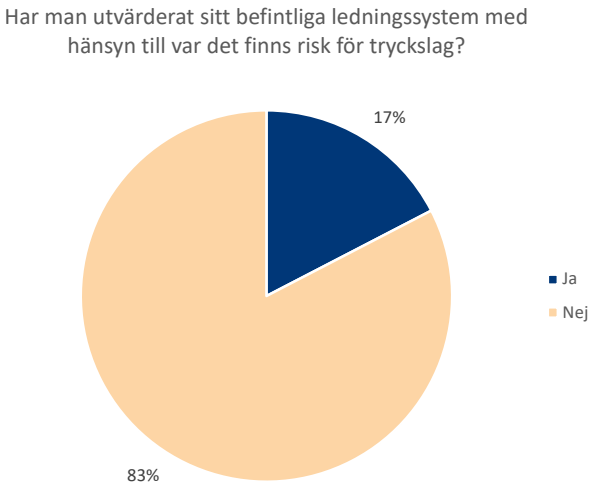
Figur 6.4
Kännedom om publikationen VAV P58.

En majoritet kände inte till publikationen. Inom de verksamheter som uppgav kännedom om den, uppgavs det att den sällan nyttjades. Även här nämndes tilliten till att konsulter har kännedom och kunskap om innehållet i publikationen.

Flertalet VA-verksamheter uppgav att de önskade en checklista som kan nyttjas för att värdera hur avancerade tryckslagsberäkningar som bör utföras, vilket lämpligen kunde införlivas i P58. Även en exempellista med typiska situationer i vilka tryckslag är en risk önskas finnas tillgängligt som verktyg för VA-verksamheternas riskbedömning. Det senare finns delvis i P58 men skulle kunna utvecklas. Nedan beskrivs några ytterligare önskemål om innehåll i P58.

- Riktlinjer för övergripande bedömning om hur avancerade tryckslagsbedömningar som krävs utifrån några nyckeltal.
- Riktlinjer för modellering och vilken stegvis modellering som kan utföras för bedömning av tryckslagsrisker.
- Komplettering av nya tryckslagsreducerande åtgärder såsom frekvensomriktare, batteribackup etc.
- Tumregler för hur snabbt ventiler får stängas i olika ledningsdimensioner i olika driftsituationer.

På frågan om organisationerna utvärderat sitt befintliga ledningsnät med hänsyn till tryckslagsrisker ser svarsfördelningen ut enligt Figur 6.5.



Figur 6.5
Andelen som utvärderat sitt befintliga ledningssystem med hänsyn till tryckslag.

Några poängterar att ledningsnätet kontinuerligt utvärderas erfarenhetsmässigt genom den dagliga driften. Flera uppger även att de, i takt med att ledningsnätsmodeller byggs upp, överväger att utvärdera det ytterligare. En annan förekommande orsak till utvärdering är om man har upplevt driftbekymmer eller läckor på enskilda ledningssegment. I de fallen har det specifika ledningssegmentet utvärderats separat.

Ett flertal verksamheter rapporterar om enskilda händelser där förändringar i ledningssystemet genererat försämrade förhållanden och större risker för tryckslag. Följande förändringar och konsekvenser rapporteras:

- Flera mindre avloppsreningsverk läggs ner och längre överföringsledningar byggs som skapar ökade tryckslagsrisker.
- Försörjning av ett område med två tryckstegringsstationer från olika håll, vilket föranlett svårigheter att kalibrera in frekvensomriktarna, med svängiga tryckförändringar som följd.
- Fyra verksamheter uppger sig försämrat tryckslagssituationen när avluftningsventiler bortkopplats alternativt underhållits bristfälligt.
- Tre verksamheter rapporterar om att vattentorn bortkopplats, permanent eller tillfälligt, och ersatts med direktförsörjning från tryckstegringsstationer, vilket genererat betydligt större tryckvariationer.
- Två verksamheter uppger att man implementerat starkare pumpar för befintliga ledningssystem vilket genererat högre hastigheter i ledningarna, utan att kompletterande tryckslagsbedömningar utförts.
- Initierande av vattenkiosker som inte utrustats med mjukstängning.
- Två verksamheter har kopplat bort tryckklockor och ersatt pumpstationen med frekvensomriktare. Det har emellertid inte säkerhetsställts om tryckklockorna hade en vital funktion som tryckslagsdämpning vid strömavbrott.

Utvärdering av ledningsprofil

Tryckledningens ledningsprofil är en central egenskap att utvärdera vid bedömning av tryckslagsrisker. Transportsystem för spillvatten utformades tidigare i högre grad genom att man pumpade från lågpunkt till högpunkt för att sedan övergå i självfallsledningar. I takt med den pågående centraliseringen av VA-systemen övergår pumpsystemen numera ofta i att färre pumpstationer byggs med längre tryckledningar som följd. Många gånger förläggs även ledningarna konsekvent på frostfritt djup innebärande att fler toppar och dalar blir en del av pumpsystemet. Sådan förläggning är fördelaktig ur ett investeringsperspektiv, men kan potentiellt skapa fler driftbekymmer. I synnerhet högpunkter är känsliga för undertrycksvågor med flödesseparation som följdrisk, medan lågpunkter kan vara känsliga för övertryck. Utvärdering av den hydrauliska profilen är

alltså också nödvändig för att säkerhetsställa att hållbara system byggs både ur investerings- och driftperspektiv. Ledningssystem anläggs generellt med en förväntad livslängd på 100 år, där fördelningen normalt innefattar 1 års anläggning och 99 års drift. Förebyggande bedömning av potentiella driftproblem bör därmed vara en självklar del i projekteringsfasen.

Figur 6.6 presenterar andelen VA-verksamheter som aktivt jobbar med den hydrauliska profilen vid förläggning av tryckledningar.

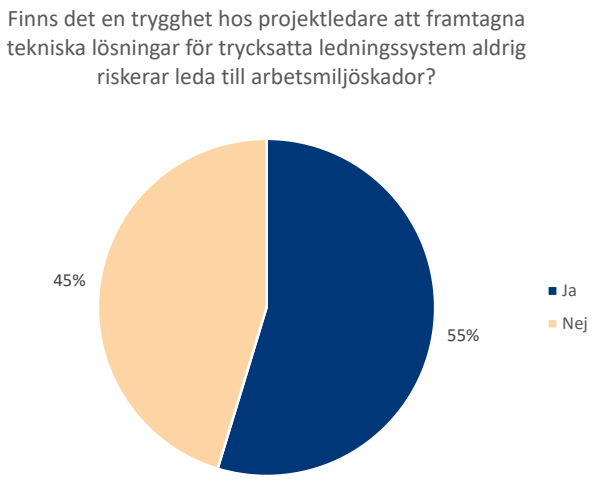
Figur 6.6
Fördelning av hur många verksamheter som aktivt utvärderar ledningsprofilen vid projektering.

Ett fåtal uppger att de själva inte utvärderar ledningsprofilen utan att de förlitar sig på att de anlitade konsulterna utför det. Denna förväntning är högst rimlig, men det vore fördelaktigt om det också fanns en uppföljning från verksamheterna som kontrollerar att fördelar och nackdelar med ledningsprofilerna är beaktade.

En kommun uppgav ett intressant exempel på en befintlig tryckledning som kompletterades med en ny i samma plansträckning. Den nya ledningssträckan utvärderades med hänsyn till den hydrauliska profilen och optimerades. Vid driftsättning konstaterades att inget flöde gick i den befintliga ledningen, då den nya ledningens profil var kraftigt förbättrad i förhållande till den befintliga ledningen.

Trygghet hos projektledare

Arbetsmiljön för driftpersonalen är viktig att säkerhetsställa vid arbete intill trycksatta ledningssystem, då ledningsbrott kan leda till allvarliga konsekvenser. VA-verksamheterna ombads svara på vilken trygghet de känner kring sina trycksatta ledningar, med hänsyn till att arbetsmiljöskador inte kan uppstå (Figur 6.7).



Figur 6.7
Fördelning av vilken trygghet verksamheterna känner kring att deras utformning av trycksatta system aldrig leder till risk för arbetsmiljöskador.

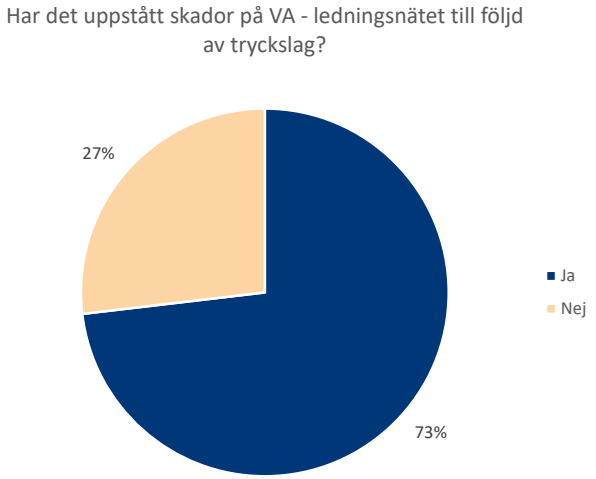
Frågan var något starkt formulerad med betoning på att man skulle känna sig *helt säker* på att skador inte kan uppstå. Det är givetvis svårt att garantera och flera verksamheter uppgav att de kände sig trygga med att de gör så gott de kan för att minimera riskerna. Tilläggas ska att det är svårt att förutse alla potentiella händelser som kan uppstå i ledningssystem, varför tryckslagsarbete ibland tvingas ske retroaktivt.

En anledning till den relativt höga andelen som är osäkra på sitt ledningssystem härrör sannolikt till att frågan om tryckslag var lite bortglömd och blev pånyttfödd efter den erbjudna föreläsningen. Det ledde till att flera verksamheter upplevde en större osäkerhet på sitt ledningssystem.

6.2 Uppkomna tryckslagsfall

I syfte att utvärdera hur stort bekymmer VA-verksamheter har med tryckslag efterfrågades om de hade kännedom om ledningsbrott till följd av tryckslag (Figur 6.8) samt om det förekom incidenter med allvarlig utgång (Figur 6.9).

6.2.1 Förekomst av ledningsbrott till följd av tryckslag



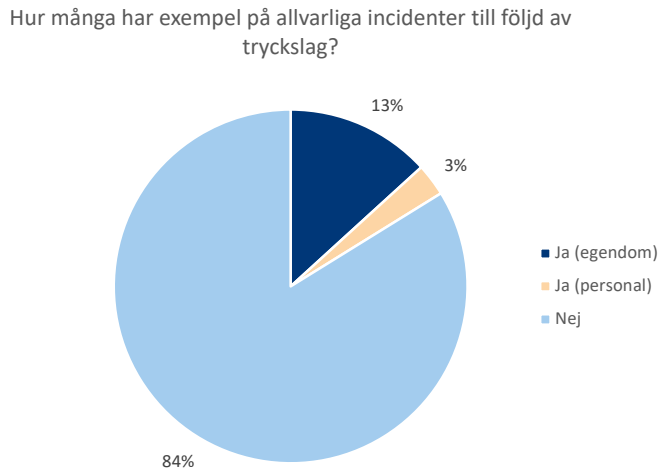
Figur 6.8
Förekomst av tryckslagsskador hos VA-verksamheter.

En osäkerhet kring förekomsten av tryckslag föreligger sannolikt då flera uppger att de vid många tillfällen misstänkt tryckslag som orsak till läckor men att det sällan har

kunnat påvisas. Ytterst sällan utförs ingående utvärderingar kring läckornas orsak. Dels uppger verksamheterna att det är en resursfråga, dels att det är svårt att i efterhand utvärdera då mätningar under förloppet saknas.

6.2.2 Allvarliga tryckslagsfall

Svaren på fråga 15 i kapitel 2, som berör allvarliga tryckslagsfall, sammanfattas och separeras mellan konsekvenser som haft stor ekonomisk påverkan respektive arbetsmiljömässig påverkan. Omfattningen av allvarliga incidenter presenteras i Figur 6.9.



Figur 6.9
Omfattning av allvarliga tryckslagssituationer som uppstått i landet.

Ungefär 15 % av de tillfrågade gav exempel på tryckslagshändelser av allvarligare slag. Exempel på personskador innefattar en olycka och två allvarliga tillbud, citerat nedan.

”Vid uppstart av en ny ledning efter en vattenläcka så var uppstarten för hastig så ledningen slogs lös. Personen som stod i gropen träffades av ledningen och gropen vattenfylldes så personen hade sand upp till bröstkorgsnivå. Personen i fråga fick dock inga bestående personskador.”

”Vid byte av en ventil på en V400 kollapsade en luftbubbla vilket gjorde att några PE-slangar slogs sönder som i sin tur träffade några barnvagnar som välte. Lyckligtvis var där inga barn i barnvagnen.”

”Ett exempel är när en stor (PE630) och lång förbipumpningsledning för avloppsvatten skulle rensas innan avveckling. Ledningen var förlagd ovan mark fram till huvudpumpstationen på reningsverket. Troligtvis var det så att en rensplugg byggde upp ett övertryck/luftficka i ledningen, när denna släppte vid utloppet sköt ledningen bokstavligt talat i luften och orsakade stora materiella skador på intilliggande utrustning och byggnader. Lyckligtvis kom ingen person till skada, men det var väldigt nära då personer strax innan hade gått på ledningen.

Nedanstående allvarliga händelser inkom som svar till enkätstudien som utfördes 2022 och presenterades i tidskriften *Vatten (*Kiste 2022*)*. De verksamheter som inkom med nedanstående svar deltog inte i SVU-studien, varför de inte är del av statistiken i Figur 6.9.

”Vid ett tillfälle skedde en kraftig tryckstöt som ledde till att rör lossnade i vägg in till en anläggning, vilket i sin tur förstörde all utrustning i anläggningen pga att det vattenfylldes.”

”Vad jag känner till så sprack ett rör i en tryckstegringsstation och orsakade större skador där en gång, orsaken var tryckslag.”

”En kollega som stängde en ventil för snabbt på en spolslang, ventilen lossnade och sköt ut i huvudet på honom.”

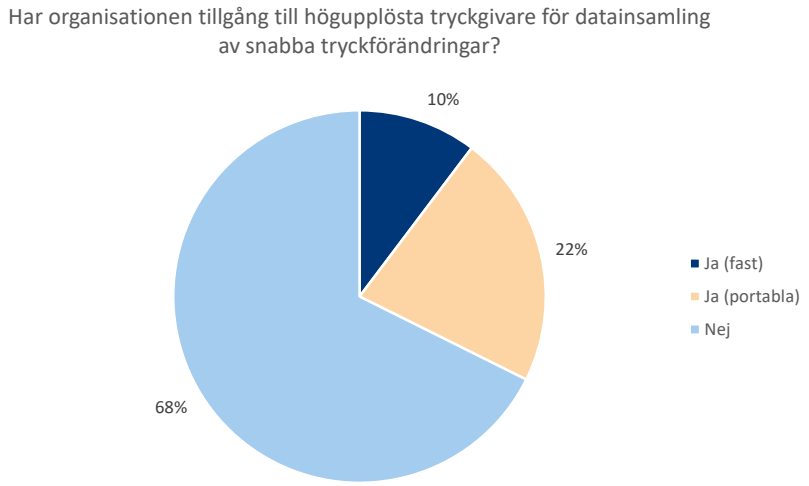
Omfattningen av allvarliga fall med risk för eller utfall av skador på personal är relativt låg. Emellertid är konsekvenserna ytterst allvarliga med risk för betydande personskador, varpå det bör strävas efter att eliminera dem.

Exempel på större ekonomiska konsekvenser innefattar följande:

- Ventiler som skjutit ut vid för snabb driftsättning av ny ledning och en mätarbrunn.
- Två kommuner har liknande exempel på situationer där ett vattentorn renoverats och omkoppling utförts till försörjning från utgående pumpar på vattenverket. Under driftomställningen fanns inga frekvensomriktare varpå pumparnas start/stopp-drift genererade flertalet läckor i vattenledningsnätet.
- En kommun uppgav att ett tryckslag skapade fem läckor i ledningssystemet. Orsak och bakgrund till tryckslagets uppkomst var okänd.
- En kommun uppgav att en ledning imploderade till följd av ett undertryck som skapades efter ett pumpstopp. Den installerade dubbelverkande avluftningsventilen sög inte in luft som önskvärt. Med bättre underhåll hade eventuellt denna situation kunnat undvikas.
- I en tryckstegring exploderade en hydropress till följd av vad man tror var ett tryckslag i ledningssystemen som översteg hydropressens tryckklass. Hela tryckstegringsstationen förstördes.
- I en avloppspumpstation uppstod ett rörbrott till följd av ett tryckslag, med följd att pumpstationen översvämmades med avloppsvattennivå upp till ca 0,5 m ovan bjälklaget.
- En bevattningspump med utgående tryck på 10 bar tvärstannade och skapade ett tryckslag som exploderade en PE110-ledning.
- Översvämning av avloppspumpstation pga. brott man tror orsakats av ett tryckslag.

6.3 Förekomst av mätning

En förutsättning för att upptäcka tryckslag i ledningsnät är en god tillgång till tryckmätning. Då vågutbredningshastigheten för tryckvågorna rör sig med 400–1 200 m/s krävs hög upplösning på tryckgivarna för att detektera tryckvariationerna, i synnerhet för kortare ledningsnät. Med högupplösta mätare avses i föreliggande fall tryckgivare med upplösning upp mot 1 000 Hz. Verksamheternas tillgång till högupplösta givare (>1 000 Hz) presenteras i Figur 6.10.



Figur 6.10
Tillgång till högupplösta tryckgivare hos VA-verksamheterna.

Några enskilda verksamheter innehar fast monterade tryckgivare och några ytterligare innehar portabla tryckgivare. Den största andelen innehar inga tryckgivare som är tillräckligt högupplösta för detektion av tryckvågor. Många nämner att förekomst av mätning generellt är begränsad och såg ett behov av fler utplacerade tryckgivare på ledningsnätet.

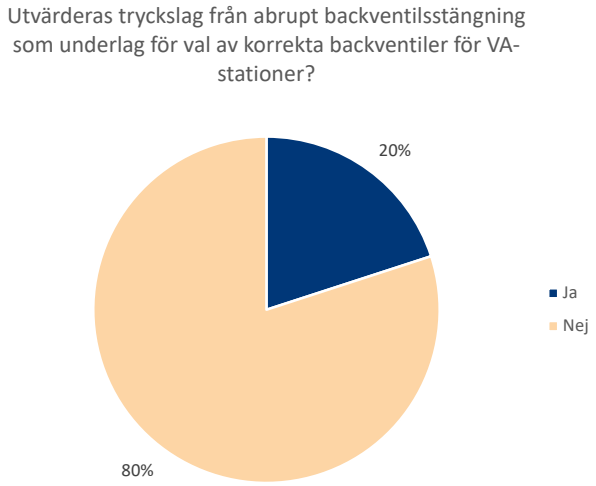
Innehas en portabel tryckgivare har verksamheter möjlighet att utvärdera tryckslagsrisker proaktivt. Många verksamheter uppger att de har enskilda segment med oförklarliga driftbeteenden, som misstänks kunna orsakas av tryckslag. Innehas en portabel tryckgivare kan den utplaceras på lämpliga lokalisationer för utvärdering om tryckslag är orsaken till driftförhållandena och om de i förlängningen riskerar att ge en betydande inre belastning som kan generera ledningsbrott. Tester kan antingen göras skarpt, innebärande att man initierar en snabb och betydande flödesförändring för att detektera maxtrycket som uppstår, alternativt genereras en något försiktigare flödesförändring. Det senare fallet ger en lägre tryckvariation, som kan värderas och eventuellt skalas upp för det allvarligaste fallet. På så vis begränsar man risken att belasta sitt ledningsnät onödigt hårt. Tester kan ge nyttig information kring tryckslagens direkta egenskaper såsom magnitud, vågutbredningshastighet, funktion av ev. tryckslagsreducerande åtgärder, men även indirekta samband för analys av hur olika driftbeteenden påverkar ledningsnätet.

Tryckgivaren kan även nyttjas för att utvärdera orsaken till läckor efter de uppstått. Vid misstanke om att eventuellt driftförfarande helt eller delvis kan vara orsaken till ett ledningsbrott, kan driftfallet återupprepas (under mer kontrollerade former) med tryckgivare utplacerad. Föreligger det ett tydligt samband kan åtgärder för att förändra driftbeteendet implementeras.

Även efter utförda tryckslagsberäkningar kan tryckgivaren nyttjas för verifikation och eventuell kalibrering av beräkningarna, lämpligen som en del av driftsättningen på det nya systemet.

6.4 Backventiler

I enkäten efterfrågades om organisationer aktivt utvärderar vilka backventiler som implementeras i projekteringsstadiet (Figur 6.11).



Figur 6.11
Andelen VA-verksamheter som utvärderar risk för backventilstryckslag vid val av backventiler.

Responsen visar tydligt att majoriteten inte värderar backventiler utifrån deras tryckslagsrisker. För denna fråga valde en relativt stor andel att inte besvara frågan (10 st). Bland andelen som svarat ”Ja” uppger flera att de själva inte utvärderar tryckslagsriskerna, men att de involverar leverantörerna i backventilsvalet och förutsätter att de tar fenomenet i beaktande.

I ett enkätsvar framkom även följande svar:

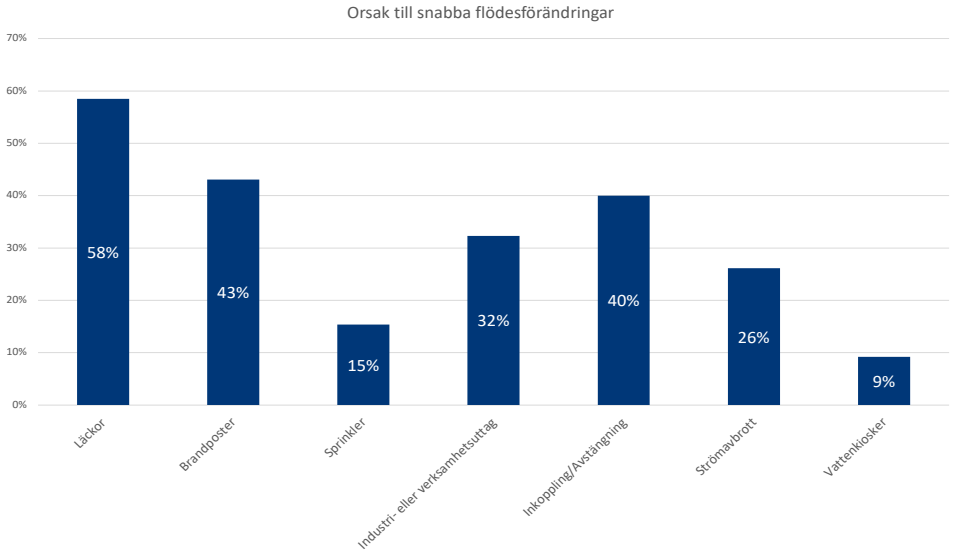
”Bedömt vara tryckslag på en pumpstation som var frekvensstyrd men man trodde eventuellt det berodde på backventilstryckslag. När backventilerna byttes ut till långsamstängande backventiler minskade problemen.”

Praktiska exempel finns därmed som styrker teorin i avsnitt 3.3.7. Ett fåtal uppger även i enkätsvaren att de inte har ett förebyggande arbete kring hantering av backventilstryckslag men att det i enskilda fall utvärderats i efterhand om problem uppstått.

6.5 Driftarbete

Förekomsten av tryckslagsfenomen märks oftast vid pågående drift. Antingen uppstår problemen under driftsättning av nya eller ombyggda stationer alternativt när åtgärder eller driftförändringar utförs på ledningsnätet.

De vanligast förekommande orsakerna till flödesförändringar i ledningssystemet rapporterade från verksamheterna presenteras i Figur 6.12.



Figur 6.12
Vanligaste orsakerna till snabba flödesförändringar i ledningssystemet.

Resultaten är blandade men läckor, brandpostuttag och inkopplingar eller avstängningar dominerar. Många av de hastiga flödesförändringarna bör kunna undvikas genom bättre informations- och kunskapsutbyte. Industri- och verksamhetsuttag samt sprinkleranvändning bör kunna reduceras med bättre samverkan och information till kunderna. Även behov av snabba öppningar och stängningar av brandposter bör kunna reduceras. Inkopplingar och avstängningar bör kunna reduceras genom försiktigare manövrering och driftsättning av ledningsnäten.

Noterbart är att vattenkiosker, vars syfte delvis är att motverka oönskad användning av brandposter, också förekommer som orsak till hastiga flödesförändringar som genererar tryckslag. Vid framtida implementering av fler vattenkiosker bör dessa utrustas med mjukstängande och -öppnande åtgärder.

Läckor är också en vanligt förekommande orsak till snabba tryckförändringar och tryckslag i ledningsnäten. Orsaken till att läckorna uppstår kan, efter de uppkommit, utvärderas genom att analysera om enskilda driftbeteenden eller ventilmanövreringar utförts kort före, eller i samband med att läckan uppstår. Inom studien efterfrågades det hur många som utvärderar orsaken till läckor i efterhand och om de går att koppla till driftbeteendet.

Sju verksamheter uppger att det har förekommit att en utredning har utförts om det uppstått upprepade läckor på samma ledningssystem. En uppger att det kontinuerligt utförs genom erfarenhetsmässigt och muntligt utbyte inom driftenheten. En uppger att de alltid utvärderar läckorna med hänsyn till tryckslag, medan en uppger att de utvärderar i fallen där det har förekommit en välgrundad misstanke om tryckslag. Resterande uppger att läckor aldrig utvärderas med hänsyn till tryckslag.

De flesta VA-verksamheter uppgav att de inte såg någon tydlig korrelation mellan yttre omständigheter såsom ledningsdimension, ledningsprofil eller flöden, och uppkomna tryckslagsproblem. Den enda tydliga slutsatsen som kunde dras var att flera verksamheter upplevde en klar förbättring i uppkomna tryckslag i VA-stationer när start/stopp-drift ersattes med antingen mjukstartare/-stängare eller frekvensomriktare. Erfarenhet kring driftbeteendet vid manövrering av ventiler nämns också, där tydliga tryckvariationer setts vid snabb manövrering. Detsamma gäller manövrering av brandposter, där samarbete och kunskapsöverföring kring mjuk reglering med entreprenörer, industrier och räddningstjänsten har hjälpt. Någon nämner också att tryckslagsproblematiken är större för vissa ledningsmaterial, främst PVC, GAP och asbestcement, vilka sannolikt är mer känsliga för tryckslag. Återigen ska det poängteras att läckor sällan utvärderas med hänsyn till tryckslag. Det går därmed inte utesluta att det kan finnas korrelation med tryckslagsproblem och enskilda yttre omständigheter.

Underhåll

Underhåll av tryckslagsreducerande åtgärder är viktigt för att säkerhetsställa funktionen. Då de allvarligaste och dimensionerande tryckslagen normalt uppstår oplanerat, såsom vid läckor och strömavbrott, är det viktigt att de tryckslagsreducerande åtgärderna alltid är i funktion.

Underhållet varierade kraftigt beroende på vilken typ av tryckslagsreducerande åtgärd som fanns i systemen. Generellt finns det väl framtagna underhållsplaner för de åtgärder som är placerade inne i, eller i direkt anslutning till, VA-stationerna. Detta inkluderar tryckklockor där kontinuerlig kontroll av nivån i tryckklockan säkerhetsställs, samt besiktning av dessa. Detsamma gäller säkerhetsventiler. Åtgärder placerade ute i ledningssystemen är generellt sämre underhållna, vilket i synnerhet avser avluftningsventiler. En stor andel av de svarande uppger dels att de inte har översikt över sina avluftningsventiler (vare sig typ eller placering), dels att underhållet av dessa är minimalt. Många upplever också reaktivt underhållsarbete med avluftningsventilerna, dvs. att de underhålls och byts först när de gått sönder. Många verksamheter har emellertid underhållsplaner med blandad efterföljning.

Några svaranden uppger också att kunskapsöverföringen mellan projekt- och driftenhet ibland brister. Det innebär att driftenheten inte alltid vet syftet med vissa enheter som är implementerade i ledningssystemen. Detsamma gäller för de äldre delarna av ledningsnätet, där dokumentation saknats kring varför enheter är installerade.

Erfarenhetsåterföring

Erfarenhets- och kunskapsåterföring till nya driftingenjörer sker generellt i muntlig form. Många använder sig av en lärlingsprocess där man initialt får gå bredvid en erfaren. Förmedling av risker med snabb manövrering i trycksatta ledningssystem återförs därmed i hög grad till ny personal, vilket bidrar till en allmän försiktighet. Relativt få verksamheter har emellertid dokumenterade utbildningsplaner där tryckslagsrisker

förmedlas. Några enskilda verksamheter uppger att ny driftpersonal direkt tillåts vara ensamma i fält. Vissa verksamheter uppger att driftoperatörer alltid ska arbeta i par, så att man inte är ensam ute på driftarbeten.

Några uppger att de har definierat i rörnätskartan vilka ledningssegment som är känsliga. Dessa får normalt inte hanteras av entreprenörer eller oerfaren personal. I samband med hantering av de känsliga ledningssegmenten brukar manövreringsarbeten och avstängningar föregås av arbetsberedningar och arbetsplaner, där varje delmoment planeras.

Den interna uppdelningen mellan VA-verk (inkl. anläggningarna) och ledningsnät verkar i enskilda verksamheter vålla problem. Det förekommer fall där manövreringar utförts på verken som inte vidareförmedlats till ledningsnätens personal och vice versa. I enskilda fall har enheterna jobbat kontraproduktivt. Ett exempel innefattar en stängning av en ventil på ledningsnätet som inte kommunicerades till VA-verket. När trycket tappades i systemet ökades pumpningen för att fylla vattentornet vilket föranledde mycket låga tryck i ledningssystemen.

Vid implementering av tryckslagsreducerande åtgärder är det viktigt att samtliga driftoperatörer får god kännedom om syftet med åtgärden samt om det är några riktlinjer som driftpersonalen behöver förhålla sig till. Det kan innefatta stängningssekvenser eller nödvändiga nivåer i hydroforer. I många situationer överförs denna kunskap bara muntligen till driftoperatörer medan flertalet även dokumenterar det i driftinstruktionerna. Många verksamheter nyttjar sig av, utöver entreprenörens överlämning till driftenheten, formella överlämningar mellan den interna projektenheten och driftenheten innan driftsättning. Många uppger emellertid att det slarvas i dessa överlämningar och att information om syftet med tryckslagsreducerande åtgärder, samt deras underhållsbehov inte dokumenteras tillräckligt väl.

6.6 Kreativa säkerhetslösningar

I några kommuner har det utarbetats smarta och enkla lösningar som kan reducera risken för tryckslag. Förslagen är mer eller mindre kostsamma att implementera och har blandad inverkan på tryckslag. Gemensamt för dem är emellertid att de i olika omfattning bedöms reducera risken för allvarliga rörbrott eller incidenter. Lösningarna är presenterade utan att de teoretiskt är utvärderade och verifierade som fungerande tryckslagsreducerande lösningar.

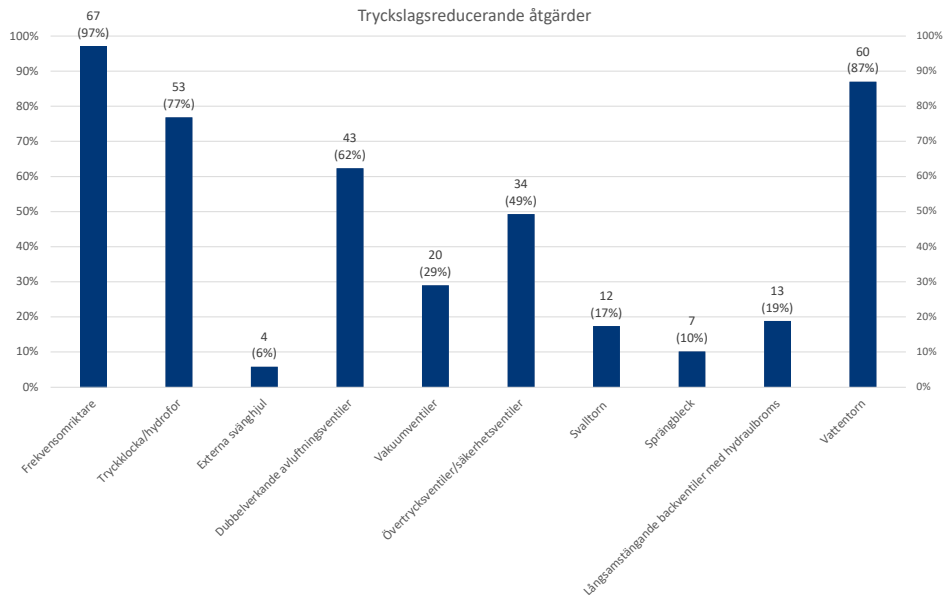
- En kommun uppgav att de var noga med att fylla på vattentorn och magasinvolymer inför besiktning av tryckklockor i tryckstegringsstationer. Under besiktningen behöver nämligen tryckklockan bortkopplas innebärande att tryckstegringsstationen inte har alla tryckslagsreducerande åtgärder aktiva. Genom att fylla upp sina magasin minimerar kommunen tiden som systemet behöver driftas utan sitt tryckslagsskydd.
- En kommun uppgav att de medvetet öppnar brandposter vid stängning av ventiler för att minimera flödesreduktionen i ledningssystemet.
- Flera uppgav att de har förreglingar på känsliga ventiler som förhindrar att ventilerna kan stängas för snabbt.
- Elektroniska förreglingar på pumpar som styrs av tryckgivare eller tryckvakter finns implementerade för att pumpar ska stoppas eller driftas på en angiven maximal frekvens om trycket i ledningen överstiger förinställda nivåer. Även flödesmässiga förreglingar finns implementerade som begränsar pumpars kapacitet att nyttjas maximalt, då man är osäker på tryckslagets storlek vid maximalt flöde i ledningen.
- Vid drifttagning av ledningar uppger en kommun att de initialt avluftar i en brandpost, men när den sista luften ska släppas ut monteras en avluftningsventil på brandposten, med syfte att den mekaniskt ska reglera det sista luftutsläppet lugnt och kontrollerat.
- En kommun nämner att de har flytande rörgallerier med förmåga att röra sig i

samband med tryckslag. Kommunen uppger att det hittills har varit en lösning som fungerat väl.

- Några kommuner använder sig av visuell information vid känsliga ventiler. En uppger att de sätter en skylt på den känsliga ventilen med information om vilket stängningsförlopp som är godtagbart. En kommun uppger att deras känsliga ventiler är målade i en annan färg.
- Ett par verksamheter uppger att de alltid sätter utväxling på 90-graders reglerade ventiler för att undvika risken att de stängs momentant.
- Exempel finns på organisationer som aktivt sätter två tryckklockor för att tryckslagsskyddet inte ska försämras när den ena tryckklockan besiktigas.
- För att säkerhetsställa tryckslagsreduceringen i högpunkter med dubbelverkande avluftningsventiler finns exempel på organisationer som kompletterar avluftningsventilen med en vakuumventil. Syftet är att bättre säkerhetsställa att luft kan sugas in i systemet för att motverka de allvarliga undertryck som kan uppstå vid abrupt pumpstopp. Då systemet även är del av ett dricksvattennät har avluftningsventilen och vakuumventilen utrustats med enheter som ska reducera risken för insug av ovidkommande vatten eller luft. Detta genom att utrusta inluften till brunnen med ett luftfilter samt installera nivåvippor i stationen som larmar om inläckande vatten fyller nivån i brunnen.

6.7 Förekomst av tryckslagsreducerande åtgärder i landet

En sammanställning av vilken förekomst det finns av de olika tryckslagsreducerande åtgärderna presenterade i avsnitt 3.3 utfördes. Figur 6.13 presenterar hur många VA-verksamheter som uppger att de har förekomst av åtgärderna inom sitt ledningsnät.



Figur 6.13
Förekomst av olika tryckslagsreducerande åtgärder hos de olika kommunerna. Siffrorna inom parentes avser andelen som innehar respektive tryckslagsreducerande enhet i förhållande till det totala antalet deltagare i studien.

Det är tydligt att vissa typer av tryckslagsreducerande åtgärder är mer förekommande än andra. Frekvensomriktare förekommer inte helt oväntat i nästan samtliga verksamheter. De flesta verksamheter innehar även ett eller flera vattentorn, även om det finns några undantag. Bland undantagen finns emellertid verksamheter som är anslutna till en annan kommuns vattentorn genom kommunövergripande samarbetsavtal för dricksvattenförsörjningen.

De vanligast förekommande åtgärderna för tryckslagsreducering verkar vara frekvensomriktare, tryckklockor och dubbelverkande avluftningsventiler. För tryckklockorna går det dock inte att säkerhetsställa att deras syfte främst var tryckslagsreducering eller om de finns av andra skäl exempelvis utjämning vid små flödesuttag. En relativt vanlig återkoppling från flera verksamheter var att ledningssystemet innehöll tryckklockor vars syfte inte var helt känt.

För avluftningsventilerna fanns det hos många kommuner en osäkerhet kring vilka typer av avluftningsventiler som fanns i deras ledningssystem. Många uppgav också att de uteslutande valde av en typ av avluftningsventil (enkel- eller dubbelverkande) för hela sitt ledningsnät och anpassade det inte utifrån respektive hydraulisk situation. Oavsett föreföll det att en stor andel av kommunerna innehade dubbelverkande avluftningsventiler. Även för avluftningsventiler förelåg en tendens att deras syfte många gånger var ovisst.

De ovanligare tryckslagsreducerande åtgärderna är externa svänghjul, svalltorn, långsamstängande backventiler med hydraulbroms och sprängbleck. Att de är ovanliga beror sannolikt på deras nackdelar uppgivna i avsnitt 3.3. Ett annat skäl är också att dessa enheter normalt inte implementeras av andra syften än tryckslag. Frekvensomriktare, avluftningsventiler, tryckklockor och vattentorn kan exempelvis introduceras till ledningssystem av helt andra syften än enbart för att hantera tryckslag.

Frågeformuläret innefattade inte bypass-lösningen eller batteribackup, varför omfattningen av de lösningarna inte är utvärderade i studien.

7 Tryckslag hos konsulter

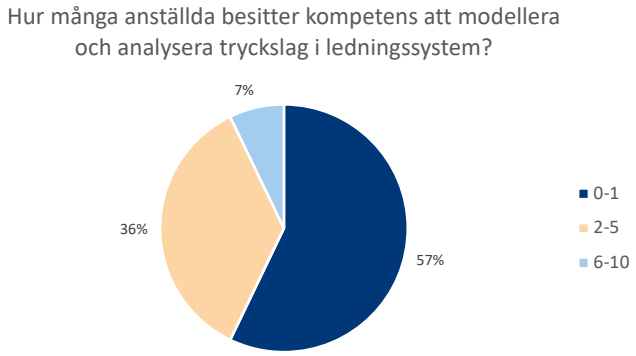
I syfte att utvärdera hur utbredd kunskapen om tryckslag är hos konsultfirmorna genomfördes en enkät som skickades ut till 14 av de större konsulterna i landet: Afry, DHI Sverige, Envidan, Hydroram, Lektus, Norconsult, Ramboll, Rejlers, Sigma, Structor, Sweco, Systra, Tyréns och WSP.

Enkäten utformades som en anonym enkät, med förhoppning att respektive firma skulle uppge sannolika antal och inte nyansera svaren för att ”framhäva” sitt företag. Flera frågor kring kompetens är dessutom inte i detalj definierade avseende vad tryckslagskompetens innefattar, vilket lämnar utrymme för subjektiv tolkning hos enkätrespondenten. Mot bakgrund av ovanstående går det därmed inte att bortse från att en viss överskattning kan ha förekommit.

7.1 Kompetens

En expertkompetens hos konsulter är viktig för att säkerhetsställa att framtagna tekniska lösningar för trycksatta system inte riskerar att leda till omfattande ekonomiska skador eller allvarliga arbetsmiljöskador. Tekniska lösningar bör vara kontrollerade mot samtliga potentiella driftfall för att säkerhetsställa att allvarliga över- och undertryck inte kan uppstå i ledningssystemet. I många situationer kan tryckslagsrisken värderas övergripande och landa i en slutsats att riskerna är ringa, medan för vissa system kan mer avancerad beräkning krävas. Avancerade tryckslagsbedömningar utfördes tidigare med grafiska metoder, men numera löses det normalt med modellering.

Att utföra gedigna tryckslagsberäkningar kräver en teoretisk kunskap om tryckslagsfenomenet men även modelleringskunskap. Figur 7.1 presenterar omfattningen av den nationella expertisen hos konsulterna inom tryckslag.



Figur 7.1
Konsulternas nationella kompetens för analys av tryckslag i VA-ledningssystem.

Noterbart är att över hälften av konsultfirmorna svarade att en eller ingen anställd, nationellt inom organisationen, innehar kunskapen att utföra tryckslagsberäkningar. De flesta av dessa uppgav inom andra frågor att de inte jobbade med tryckslag, varför bedömningen är att de flesta sannolikt inte har någon som utför tryckslagsberäkningar. Ett företag uppgav att de har mellan 6 och 10 personer medan fem konsultfirmor har 2–5 personer som utför tryckslagsberäkningar. Så som frågan formulerades fanns det ingen tydlig definition kring vad som inbegrips i att ”besitta kompetens i att modellera och analysera tryckslag”. Det föreligger säkert en spridning i kunskapsnivån bland det uppskattade antalet, där några nivå inbegriper en ren modelleringskunskap medan

en del även har förmågan att validera modellresultat med teoretiska resonemang. En koppling till företagens respektive storlek går dessvärre inte att utläsa eftersom frågeformuläret utformades anonymt.

Utökas avgränsningsområdet till att även inbegripa internationell kompetens, går det att utläsa en jämn fördelning mellan förekommande experter i Norden, Europa och världen (Figur 7.2).

Figur 7.2
Fördelning mellan placering av tryckslagsexperter hos de deltagande företagen.

Det ska noteras att resultaten speglar var det finns internationell kompetens hos företagen och att ett och samma företag kan ha experter lokaliserade både i Norden, runt om Europa och i världen. Totalt sett uppgav nio företag att de hade internationell kompetens, varav tre av dem hade kompetens i mer än ett av de tre områdena uppgivna i Figur 7.2.

Nyttjande av internationella resurser försvåras kontinuerligt till följd av skärpningar kring hur ledningsdata delges. VA-verksamheternas ledningsnät är sekretessbelagda handlingar och högre säkerhet ställs på distribution och delgivande av ledningsunderlag. Vid nyttjande av internationella resurser är det därmed viktigt att VA-verksamheterna säkerhetsställer att informationsutbyte utförs på ett korrekt sätt och till personer som är tillräckligt säkerhetsklassade.

7.2 Programvaror

Den matematiska beskrivningen av tryckslag härleds från de grundläggande ekvationerna för fysikalisk beskrivning av vätsketransport, nämligen kontinuitetsekvationen och rörelsemängdsekvationen. Vid betraktande av instationär strömning härleds de två tryckslagsekvationerna, som är två partiella differentialekvationer som inte är lösbara analytiskt:

$$\frac{a^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \qquad \text{Kontinuitetsekvationen} \qquad (4)$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + f\frac{V|V|}{2g\,D} = 0 \qquad \text{Rörelsemängdsekvationen} \qquad (5)$$

där a är utbredningshastigheten, V är hastigheten, H är trycket, g är gravitationskonstanten, f är friktionsfaktorn och D är diametern. Variablerna x och t står för den rumsliga respektive tidsmässiga dimensionen.

För en fullständig beskrivning och härledning hänvisas till litteraturen (Zhang 2020; Larock et al. 2000; Jönsson & Larsen 1975). Olika numeriska beräkningsmetoder nyttjas för att lösa ekvationerna, vilket utförs med modelleringsprogram. De vanligaste numeriska beräkningsmetoderna är karakteristikmetoden (MOC) och vågmetoden (WM). Skillnaden mellan metoderna avser främst hur beräkningarna mellan randvillkoren utförs (Jung et al. 2009). Vågmetoden anses vara mindre datakrävande eftersom

den enbart behöver beräkna tryck och hastighet vid randvillkoren för varje tidssteg. Karakteristikmetoden kräver att samtliga spatiala punkter räknas ut för varje tidssteg. Emellertid finns det flertalet studier som visar att slutresultatet blir likvärdigt oavsett val av numerisk beräkningsmetod (Wood et al. 2005).

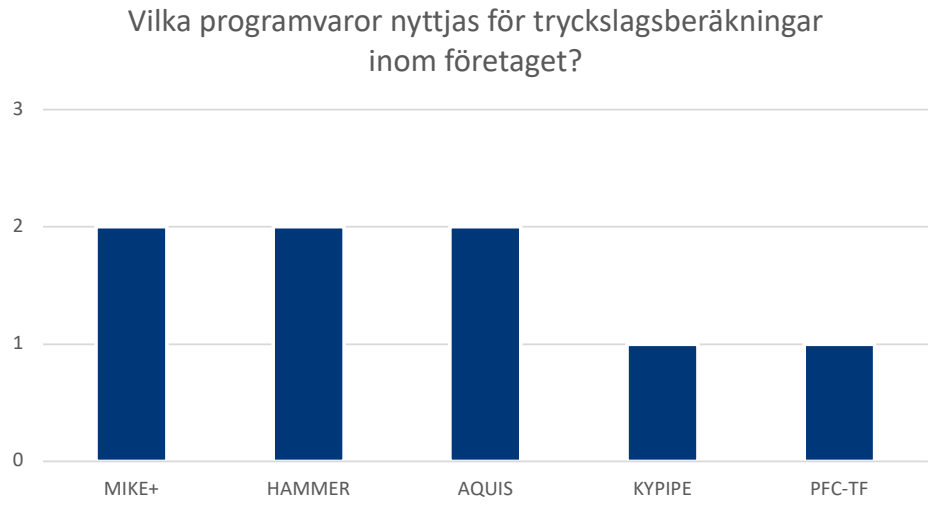
Tabell 7.1 presenterar vilka beräkningsprogram för tryckslag som finns samt vilken beräkningsmetod som respektive program utgår från (Abdeldayem et al. 2021). Listan har blivit reviderad utifrån vilka program som är aktiva.

Utgivare	Programvara	Numerisk beräkningsmetod
Applied Flow Technology	AFT Impulse	MOC
Bentley Systems, Inc	HAMMER	MOC
Deltares	WANDA	MOC
DHI	MIKE+	MOC
DNV	LIQT	MOC
EPA	EPA SURGE	WM
Flow Science Inc.	FLOW 3-D (CFD)*	TruVOF
Hydratek	TRANSAM	MOC
Hydroram	PFC/Xram	MOC
Innovyze	InfoWater Pro	WM
KYPIPE	KYPIPE SURGE	WM
University of Auckland	HYTRAN	MOC
University of Cambridge	PIPENET	MOC
University of Texas at Austin	TSNet**	MOC
University Politécnica de Valencia	ALLIEVI	MOC

* Computational Fluids dynamics
** Python-paket

Tabell 7.1
Omfattning av tillgängliga program för tryckslagsberäkningar.

En statusbedömning av vilka program som nyttjas av konsulterna på den svenska marknaden utfördes och resultaten sammanfattas i Figur 7.3.



Figur 7.3
Förekomst och användning av tryckslagsprogram hos konsultbolag i Sverige.

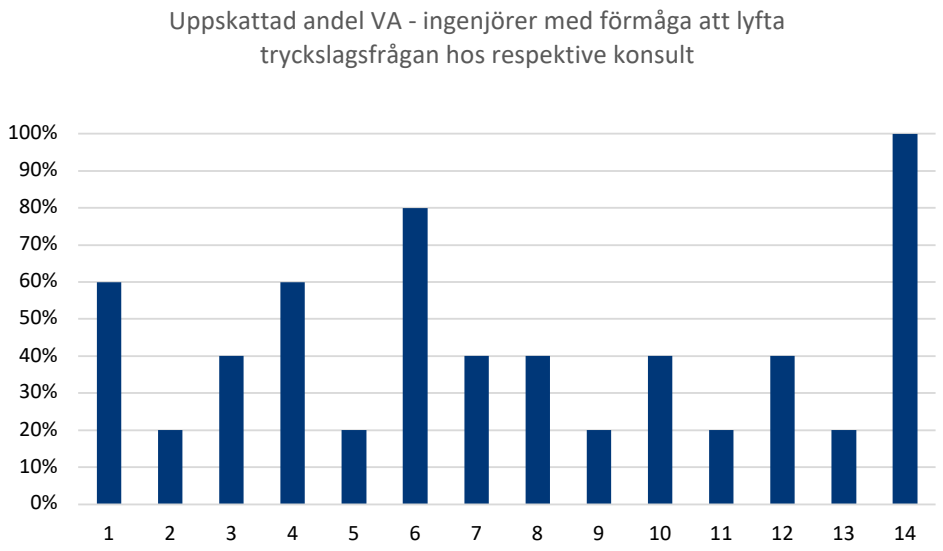
Några enskilda program nyttjas och mellan dem finns en jämn fördelning. Av de totalt 14 deltagande konsulterna uppgav åtta att de inte nyttjade något tryckslagsprogram medan två aktivt nyttjade mer än ett program. Programvaran PFC-TF är ett egenutvecklat program som används av Hydroram. KYPIPE användes inte av den nationella expertisen inom konsultfirman som uppgav att programmet nyttjades.

Utöver att programmen utgår från olika beräkningsmetoder hanterar de även olika typer av randvillkor såsom pumpar, ventiler, avluftningsanordningar, hydroforer etc. på olika sätt. För att resultaten ska bli tillförlitliga är det viktigt att randvillkoren definieras korrekt utifrån vedertagna teorier. Eftersom teorierna utgår från ett antal antaganden och förenklingar, är gedigen kunskap och förståelse nödvändig hos modellerare för att framtagna resultat ska vara tillförlitliga.

Det bör nämnas att det finns risker med de välutvecklade kommersiella programvarorna. Verktygen är mycket bra och användbara men ger även en följdeffekt att programmen kan nyttjas utan särskilda förkunskaper i tryckslagsteori. Innan de kommersiella programmen fanns krävdes en djupgående teoretisk kunskap för att kunna utföra beräkningar, då beräkningsförfarandet är komplicerat. I dagsläget finns emellertid möjligheten att genomföra beräkningar utan dessa förkunskaper, då det ”räcker” att ladda ner programvaran och med en kort introduktion går det att utföra beräkningar. Utan bakgrund och förkunskap kring hur programmet fungerar samt vilka randvillkor som är essentiella riskeras att felaktiga bedömningar utförs. För utförande av tryckslagsberäkningar rekommenderas det starkt att modelleraren även har en ingående bakgrundsförståelse till fenomenet.

7.3 Kunskapsbredd hos konsulter

En återkommande förväntan från VA-verksamheter är att konsulterna besitter kunskap att både modellera och kunna påtala när risker för tryckslag föreligger. De olika konsulterna ombads att uppskatta hur stor andel av den ”generella VA-ingenjören” som besitter kunskap att lyfta om tryckslagsberäkningar behöver utföras eller ej (Figur 7.4).



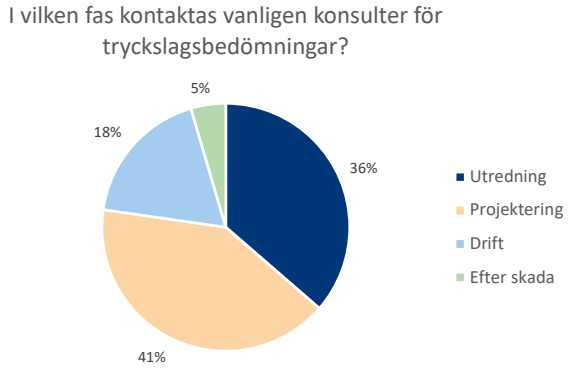
Figur 7.4
Uppskattad andel VA-ingenjörer hos konsulterna som kan lyfta frågan om tryckslagsberäkningar behöver utföras eller ej.

Resultaten visar att tio av de tillfrågade konsulterna bedömer att 40 % eller färre av konsulternas VA-ingenjörer har förmåga att lyfta frågan om tryckslagsberäkningar. En konsult återkopplar att över 80 % innehar förmågan medan ett företag uppger 100 %.

Det ska tilläggas att ett av de deltagande konsultbolagen är ett tvåmannaföretag som enbart jobbar med att utföra tryckslagsberäkningar. Kunskapen hos den ”generella VA-ingenjören” avseende tryckslag är därmed låg varpå VA-verksamheterna bör vara medvetna om att det inte är självklart att konsulten kontrollerar detta vid utredning och projektering av trycksatta ledningssystem.

7.4 Vem initierar frågan?

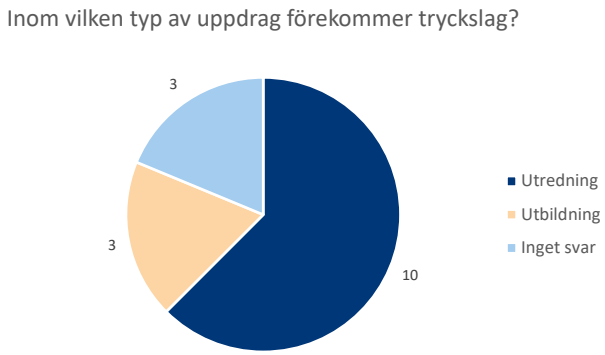
Konsulterna uppger tydligt att kunskapen om tryckslag är låg inom organisationerna. I de fall frågan ändå lyfts har det kartlagts i vilken projektfas frågan lyfts respektive vem som lyfter den (Figur 7.5).



Figur 7.5
Sammanställning av konsulternas bedömning beträffande i vilken fas de kontaktas för att utföra tryckslagsberäkningar.

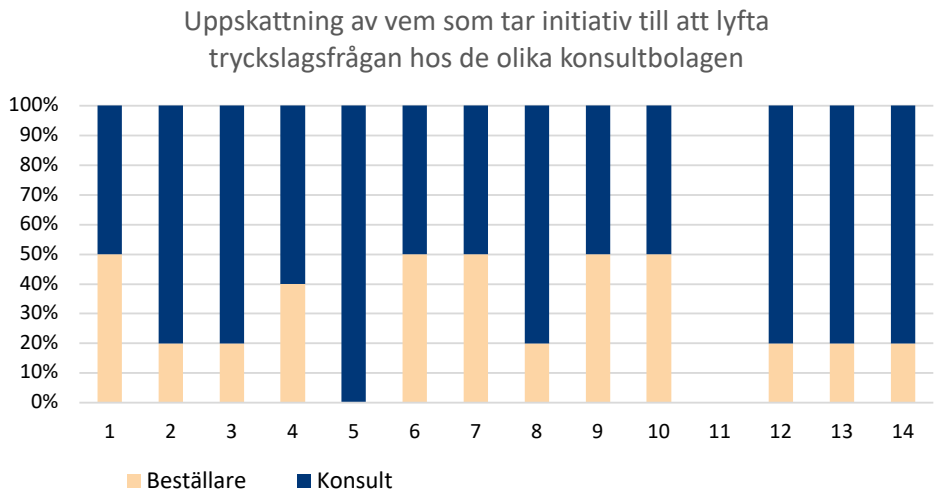
Vanligtvis lyfts frågan inom ett utrednings- eller projekteringsskede. I enstaka fall har behovet av tryckslagsbedömning lyfts i senare skeden, sannolikt efter att driftbekymmer uppstått. I ett fall har kontakt tagits efter en skada uppstått.

Figur 7.6 presenterar i vilka olika typer av uppdrag som tryckslagsberäkningar utförs. Det vanligaste är att uppdragen utförs i utredningsfasen. Tre konsultfirmor har även varit delaktiga i utbildningsuppdrag kring tryckslag. Tre konsultfirmor hade ingen erfarenhet av uppdrag som berör tryckslag.



Figur 7.6
Typ av uppdrag som behandlar tryckslag.

Företrädarna för konsultfirmorna ombads också uppskatta om det vanligtvis är konsulterna eller VA-verksamheterna som lyfter frågan om behov av tryckslagsberäkningar (Figur 7.7).



Figur 7.7
Sammanställning över konsulternas bedömning av vems initiativ det är att tryckslagsberäkningar utförs. En konsult svarade inte på frågan.

Svarsresultaten indikerar att konsultfirmorna uppskattat att tryckslagsfrågan oftast lyfts av konsulterna. Fem konsultfirmor uppskattade att det är en jämn fördelning mellan om konsulten eller beställaren lyfter tryckslagsfrågan. Över hälften uppger att det oftast är konsulten som lyfter frågan om behov av tryckslagsutvärdering.

8 Omvärldsbevakning

8.1 Goda standarder

Sydney Water har en framtagen guide för tryckslagsberäkningar i *Transient Analysis Guideline* (Sydney Water 2022). Dokumentet definierar hur tryckslagsarbeten inom stadens projekt ska utföras. En intressant detalj är att Sydney ställer specifika krav på vilken kompetens/erfarenhet en hydraulisk ingenjör behöver ha för att få utföra tryckslagsbedömningar. Kravställningen är de två högsta hydrauliska kompetensklasserna H3 (relevant högskoleingenjör, med minst sju års erfarenhet och fyra likvärdiga uppdrag) för utredare och H4 (relevant högskoleingenjör samt tio års erfarenhet och fem likvärdiga uppdrag) för utredningsansvarig, definierade i *Sydney Water Engineering Competency Standard (Sydney Water 2021)*. Dessutom kravställs oberoende granskning av en intern projektchef eller senior ingenjör.

Riktlinjen definierar även vem som har rätt att utföra bedömningar kring om en tryckslagsbedömning behöver utföras eller ej, samt till vilken detaljeringsgrad den ska utföras. Är slutsatsen att det inte behöver utföras ska det dokumenteras i en dimensioneringsrapport där specifika punkter måste inkluderas (projektmål, underbyggda motiveringar till varför det inte behövs, risker samt grov beräkning som påvisar att avancerad tryckslagsberäkning ej är nödvändig).

Riktlinjen presenterar även vilka generella situationer som ska kontrolleras och designas utifrån. Krav ställs också på att en utmattningsanalys av ledningarna ska utföras för att säkerhetsställa att de inte slits ut i förtid.

8.2 Smarta tryckslagsmätare

En del företag har utvecklat specifika lösningar för att detektera uppkomna tryckslag i ledningssystemen med syfte att optimera ledningsnätet. Ett urval av lösningar presenteras, men deras funktion har inte utvärderats.

Syrinix/SurgeView™

Syrinix är ett brittiskt företag som har specialiserat sig på högfrekvent tryckövervakning och läcksökning för VA-ledningar. Syrinix levererar fjärrövervakningsutrustning för ledningsnät. Genom att installera sensorer på ett ledningsnät som kontinuerligt samlar in högupplöst data i realtid kan olika parametrar relaterade till ledningens skick inklusive tryck, flödeshastighet och temperaturförändringar övervakas.

Anpassningsalternativ tillåter användare att bestämma vilka händelser som ska utlösa varningar baserat på ledningsnätets egenskaper och rörens material. Den högfrekventa dataloggningen gör att analysverktyget kan upptäcka mönster, avvikelser och trender som kan indikera problem på ledningsnätet som läckor och tryckslag samt identifiera var på nätet problemet har uppstått. Detta gör det möjligt att övervaka avvikande beteende, nätverksspänningar och tryckslag varav de flesta ofta är osynliga vid lägre upplösning med enklare loggningsenheter.

När systemet identifierar en plötslig kritisk förändring, t.ex. en läcka, genereras en realtidsvarning. Varningen skickas till användaren vilket möjliggör snabb respons för att åtgärda problemet och minimera skador innan kunder märker några problem. Om systemet identifierar ett tryckslag, som kan bidra till uppkomsten av läckor, kan informationen användas för att dämpa detta (Syrinix, 2017).

Liksom Syrinix erbjuder Xylem/Visenti en mjuk- och hårdvarulösning för tryckövervakning av ledningsnät i realtid. View är Visentis huvudplattform som möjliggör

insamling och analys av data. SurgeView™ är deras tjänstbaserade lösning som i realtid integrerar sensorer med flerfrekvenstryckövervakning för att detektera uppkomst av tryckslag på ledningsnät. Sensorer placeras strategiskt på ledningsnät, räckvidden är upp till 4 km per sensor, och tryckdata överförs i realtid till deras programvara. Då datainsamling sker kontinuerligt över längre perioder kan SurgeView™ lära sig hur tryckvariationen upplevs av olika delar av ledningsnätet. (SurgeView™ 2017)

Genom att använda fjärrövervakningsutrustning för tryckövervakning och läcksökning på ledningsnätet ges VA-bolag möjlighet att snabbt reagera på allvarliga störningar samtidigt som man jobbar proaktivt med driftjusteringar för att förhindra slitage på ledningsnät. Genom att analysera mönster och avvikelser kan övervakningssystemet användas till en övergripande optimering av VA-ledningsnätet samtidigt som potentiella problem upptäcks och användaren skapar sig en bättre uppfattning om onormala aktiviteter. Detta kan förlänga livslängden på rörledningsnätet samtidigt som kostnaderna minskas genom att minska dyra nödsituationer och reparationer. Insamlade data kan även fungera som beslutsstöd för VA-verksamheterna gällande proaktiva underhållsplaner och resursallokering.

Smartvalve™

SmartValve™ erbjuder en mjukvara som hanterar och övervakar manuella ventilmanövreringar på ledningsnät. SmartValve™ app samlar information i realtid. Den insamlade datan skickas sedan till ett webbaserat program som tillåter vidare visualisering och analysering för operativ kontroll.

När en ventilmanövrering ska göras fästs mobilen på en ventilnyckel genom Quadlock som är ett kommersiellt tillgängligt låssystem. SmartValve™ registrerar hur ventilen manövreras där svängriktning, svänghastighet och antalet vridna varv registreras. Även vibrationsdata som plockas upp genom ventilnyckeln loggas vilket kan ge en indikation på om vatten passerar eller att det kan finnas en läcka i närheten av ventilen.

De flesta ventiler hanteras i dag manuellt av drifttekniker vilket även länge varit det vanligaste tillvägagångssättet. En ogynnsam ventilmanövrering på grund av okunskap kan leda till missfärgat vatten, läckor eller rörsprickor. SmartValve™ designades och utvecklades för att förbättra hur ventilmanövreringar organiseras, verkställs och övervakas för att minska ineffektiva manövreringar på distributionsnäten (SmartValve™ 2022).

8.3 Kostnad för läckor

Vattenläckor har en omfattande påverkan på många områden i samhället. De vanligaste konsekvenserna är leveransavbrott, trafikstörningar, skador på egendom samt reparationskostnader. När huvudledningar för vattenförsörjning drabbas av brott, uppstår oftast driftstörningar och driftbrott som påverkar både boende och olika verksamheter. Påverkas känslig verksamhet såsom sjukhus och vattenkrävande industri blir konsekvenserna särskilt kännbara.

Kostnaden för en vattenläcka kan variera beroende på olika faktorer. Vid avbrott i infrastruktur är det vanligt att fokusera på den faktiska kostnaden, som omfattar:

- Beredskap (läckor kan inträffa när som på dygnet, är oftast akuta och måste åtgärdas direkt. Ofta måste reparationen ske utanför normal arbetstid kallad beredskapstid).
- Avstånd (transporttid av personal, maskiner och material).
- Schaktning (påverkas av ledningsdjup).
- Andra ledningar i mark (grävarbetet försvåras om det finns flera ledningar i schakten).
- Marktyp (trafikled, grönyta, åkermark).
- Reparationsmetod och reparationsmaterial.

- Ledningstyp (dimension och material).
- Area på schaktgrop (kostnad för återfyllnad).
- Trafik (ledningar är ofta förlagda i gator vilket medför trafikstörningar vid rörbrott).

VA SYD gör varje år en sammanställning om snittkostnaden för ett rörbrott på dricksvattennätet separerat för de fem medlemskommunerna Malmö, Lund, Burlöv, Eslöv och Lomma. Kostnadssammanställningen utgår från de faktiska kostnaderna kopplat till rörbrottet, dvs. inkluderar arbetstid, material, återställning och avstängningskostnader. Sammanställningen för de senaste fem åren ses i Tabell 8.1. Den totala kostnaden för dricksvattenläckor år 2023 redovisas också för respektive kommun.

Tabell 8.1
Snittkostnad per läcka mellan år 2019 och 2023 för de fem medlemskommunerna i VA SYD.

	Snittkostnad per läcka (kr)				
År	**Malmö**	**Lund**	**Burlöv**	**Eslöv**	**Lomma**
2019	90 000	110 000	80 000	70 000	90 000
2020	140 000	110 000	130 000	130 000	120 000
2021	90 000	90 000	80 000	60 000	90 000
2022	130 000	120 000	220 000	210 000	130 000
2023	170 000	250 000	220 000	110 000	190 000
Totalkostnad* 2023	17 100 000	6 900 000	2 000 000	3 500 000	900 000

*Kostnaderna är avrundade till närmaste 10 000-tal förutom totalkostnaderna som är avrundade till närmsta 100 000-tal.

Snittkostnaden per läcka varierar mellan 110 000 och 250 000 kronor år 2023. Den totala kostnaden för rörbrott samma år skiljer sig markant vilket är en följd av att de fem kommunernas storlek skiljer sig väsentligt åt. Enligt Alesand (2013) så är vilken marktyp läckan sker i, avstånd till läckan, vilka reparationsmetod som behöver användas samt ledningens material och storlek de faktorer som påverkar de faktiska kostnaderna mest.

År 2021 lät VA SYD utföra en fallstudie där de utöver den faktiska kostnaden försökte beräkna den totala samhällskostnaden av en stor dricksvattenläcka i centrala Malmö. Detta för att försöka synliggöra både faktiska och indirekta kostnader som uppstår vid avbrott i VA-infrastrukturen. I rapporten framkom det att samhällets totala kostnad var sex gånger större än den faktiska kostnaden som beräknades till drygt 2 miljoner kronor. Rapporten konstaterar att de indirekta kostnaderna har varit svåra att kvantifiera men omfattar exempelvis den längre restiden som uppstått för busstrafik, cyklister och bilister, förväntade näringslivsförluster samt extra hanteringskostnader för kommunen och kommunala bolag (Grimbäck & Silbersky 2021).

Infrastrukturen för vatten och avlopp är en viktig del i samhällsbygget. Detta understryker behovet av att investera resurser i förebyggande åtgärder. Genom att göra detta kan samhället undvika potentiella kostnader som kan uppstå om åtgärder inte vidtas i förväg.

9 Diskussion

9.1 VA-verksamheter

Under de erbjudna föreläsningarna återkopplade deltagarna generellt att de upplevde att tryckslagsfrågan var bortglömd och att en uppfräschning var uppskattad. Tryckslagsbedömningar behöver inte alltid vara avancerade, men det är viktigt att frågan åtminstone beaktas och värderas. I många fall kan en inledande tryckslagsutvärdering kring driftförhållandena i ledningen vara fullt tillräcklig. Viktiga parametrar att beakta är hastigheten i ledningen, ledningens material och längd samt förekomst av riskpunkter längs ledningen där höga och låga tryck kan uppstå.

För överföringsledningar är tryckslagsriskerna generellt större än i distributionssystem, varpå tryckslagsbedömningar bör vara en självklar del i utrednings- och projekteringsarbetet för överföringsledningar. Risker kan emellertid föreligga i distributionssystem också, framför allt i zoner med högt stationärt tryck, samt högpunkter där risk för undertryck med efterföljande flödesseparation föreligger. Förekomst av undertryck kan också innebära att ovidkommande vatten sugs in, vilket kan ge kvalitetsbekymmer eller i värsta fall förorening av dricksvattennätet.

De flesta VA-verksamheter uppgav att ledningsbrott uppstått till följd av tryckslag. I de flesta fall hade tryckslagen inte en allvarlig karaktär utan innebar främst en läcka. Det fanns dock flera exempel på allvarliga händelser som lett till arbetsmiljömässiga risker eller större ekonomiska följder. Lyckligtvis är de allvarliga händelserna relativt sällsynta vilket tyder på att VA-verksamheterna har förhållandevis bra koll på sina ledningssystem. I de fall de händelserna trots allt uppstår riskeras fruktansvärda följder om personal är i närheten av brottet och dessa fall bör i största mån elimineras för att undvika personskador. Tryckslagsrisker får därmed inte undervärderas och ordentliga riskanalyser bör utföras innan trycksatta system sätts i drift. Implementering av tryckslagsreducerande åtgärder är en metod, men lösningar som förhindrar att personal befinner sig i närheten av trycksatta system vid förändring av flödet bör eftersträvas. Exempelvis bör manövrering av ventiler i ventilkammare utföras med fjärrstyrning eller ovan mark. Även vid driftsättning av ledningar bör det eftersträvas att personal inte befinner sig i närheten av de på förhand definierade riskpunkterna längs ledningen.

Diskussionen kring tryckslag kopplas ofta till enskilda händelser som leder till direkta ledningsbrott. Risker för utmattning av ledningar till följd av frekventa tryckförändringar är emellertid en betydligt ovanligare diskussion. Som nämnt i avsnitt 3.4 är en lednings yttre omständigheter kostsamma att åtgärda när ledningen väl är förlagd, medan de inre belastningarna är möjliga att påverka med driftbeteendet. Även för en ledning som är utsatt för yttre omständigheter som försvagar ledningen, kan tryckslaget vara den utlösande faktorn till att ledningsbrottet faktiskt uppstår. Att säkerhetsställa att skadeorsaken härrör till ett tryckslag är svårt och kräver efterforskning om rådande driftförhållanden i samband med ledningsbrotten. Emellertid kan en utvärdering om uppkomna flödesförändringar i ledningssystemet utföras. Utvärderingen behöver nödvändigtvis inte vara särskilt avancerad, utan det kan vara tillräckligt att utföra en översyn av driftbeteendet kort innan läckan uppstod. Möjligen kan en hastig flödesförändring såsom en snabb ventilstängning, pumpstopp, eller öppning av brandpost ha utförts kort innan läckan uppstod. Finns det ett samband kan beslut om vidare utredning vidtas för att bedöma om framtida läckor kan förebyggas genom att förhindra driftbeteendet.

Det är svårt att kvantifiera hur stor andel läckor som hade kunnat förebyggas, alternativt fördröjas, om kunskapsläget och arbetet med tryckslag hade varit bättre. Ett förbättrat kunskapsläge hade sannolikt utvecklat förståelsen kring fenomenet vilket i förlängningen kan minska läckfrekvensen. Som framkommit i Tabell 8.1 är kostnaden

för läckor betydande och det finns pengar att spara om enskilda läckor kan förebyggas. En ökad förståelse kring tryckslagens uppkomst och påverkan kan i framtiden också leda till att tryckslagsrisker kan minimeras vid ny- eller ombyggnad av ledningssystemen. Ett förbättrat driftbeteende kan förhoppningsvis också generera att ledningar i mindre grad utmattas med följden att ledningslivslängden ökar.

För att styrka resultaten från tryckslagsbedömningar bör kompletterande mätningar utföras. Det är viktigt att poängtera att en modell alltid är en förenklad beskrivning av verkligheten och mätningar validerar om modellen är korrekt avgränsad. Vid driftsättningar rekommenderas tryckslagstester och -mätningar utföras för att verifiera modellernas resultat samtidigt som det kontrolleras att rätt designklass valts för ledningarna. Att provköra det allvarligaste tryckslagsfallet kan emellertid vara känsligt, varför det rekommenderas att stega sig upp till det dimensionerande tryckslagsfallet. Initialt kan ett tryckslag genereras med halva dimensionerande flödet, resultaten uppmätas och modellen valideras. Stämmer modellen kan man prova högre flöde och stegvis når man upp till det dimensionerande tryckslagsfallet. Utförande av mätningar kommer också generera ett kunskapslyft hos konsulter och VA-verksamheter då förståelsen för fenomenet kommer öka.

Utvärderingen visade inte en tydlig koppling mellan att de mindre VA-verksamheterna arbetade mindre med tryckslag än de större, vilket inte tyder på att kunskapen nödvändigtvis härleds till en resursbrist hos mindre VA-verksamheter. Några enskilda av de större utmärkte sig dock med hänsyn till tryckslagsarbetet, främst Sydvatten och Göteborgs Stad Kretslopp och Vatten. I dessa fanns en historik med gedigna tryckslagsutredningar och en allmän uppmärksamhet kring tryckslag. I övrigt var arbetet kring tryckslag lågt.

En allmän förvirring kring vilka typer av avluftningsventiler som finns i de olika VA-verksamheternas ledningssystem verkade föreligga. Väldigt många uppgav att de inte vet om deras avluftningsventil är av enkel- eller dubbelverkande funktion. Ur tryckslagshänseende är funktionsskillnaden viktig, då enkelverkande avluftningsventiler inte reducerar undertrycksrisker (utöver att luft i ledningssystem inte är att föredra). Uppstår undertryckssituationer är det essentiellt att veta om luft sugs in, för att dämpa tryckslaget, eller om den funktionen inte finns. Insug av luft till ledningssystem bör utföras med aktsamhet då det, speciellt för dricksvatten, riskerar påverka dricksvattnets kvalitet. Dubbelverkande avluftningsventiler bör därmed främst placeras i riskpunkter för allvarliga undertryck, som kan leda till flödesseparation. I andra fall rekommenderas enkelverkande avluftningsventiler, i de högpunkter man bedömer att luft behöver evakueras. Vid begränsade undertryck, där risk för förångning inte bedöms föreligga kan även enkelverkande avluftningsventiler vara att föredra.

Underhåll av tryckslagsreducerande åtgärder i anläggningarna var relativt väl dokumenterade i underhållsplaner. Sannolikt härrör det till att ordentliga driftinstruktioner framtages för drift av pumpstationer i samband med nybyggnationer. I anläggningar utförs kontinuerlig tillsyn av driftpersonal, medförande att skicket för de tryckslagsreducerande åtgärderna i anläggningarna (huvudsakligen tryckklockor) ofta kontrolleras. Ute på ledningsnätet är tillsynen mer begränsad, vilket tydliggörs av att VA-verksamheterna generellt har väldigt dålig kontroll över sina avluftningsventiler. Många uppger att avluftningsventilerna inte är kartlagda och i fallen de kartlagts rapporteras att flera är avstängda eller ur funktion. Ledningsägarna behöver framöver inventera sitt ledningsnät och förstå syftet med sina avluftningsventiler och dokumentera det, för att utarbeta nödvändiga underhållsplaner. Vid nyetablering bör även drift- och underhållsinstruktioner utarbetas för enheter som placeras ute på ledningsnätet.

Dokumentationen av tryckslagsförhållanden är ytterst begränsad hos VA-verksamheterna. Ett fåtal har interna riktlinjer nedtecknade men de flesta saknade dokumentationen. Den framtagna branschstandarden VAV P58 verkade ha marginell användning. Flera uppgav att den glömts bort men flera uppgav också att innehållet var svårt att ta

till sig och önskade en enklare checklista för initial bedömning av behovet och nivån av tryckslagsberäkningar.

VA-verksamheterna saknade också nedtecknade rutiner kring hur nyanställd driftpersonal ska få kännedom om tryckslagrisker. De flesta verksamheter efterföljde ett lärlingssystem, vilket är positivt och en god rutin för att undvika oaktsam manövrering från ny personal. I enskilda verksamheter förekom det dock att oerfaren driftpersonal potentiellt tillåts utföra ensamarbete direkt, vilket bör undvikas. Utan en grundförståelse om riskerna med snabba manövreringar riskeras allvarliga arbetsmiljömässiga händelser. En god rutin vid introduktion vore om ett kortare A4-dokument som belyste risker med tryckslag fanns framtaget för att genomgås och kvitteras av driftpersonal vid nyanställning.

9.2 Konsulter

Tryckslagskunskapen hos konsulter är i detalj svår att analysera, främst då frågeformuläret utformades anonymt, men också då utvärderingen byggde på konsultrepresentanternas egna upplevelser om antalet kunniga tryckslagsmodellörer. Som med all subjektiv bedömning föreligger det osäkerheter kring vad som krävs för att anses vara en expert inom tryckslagsmodellering. Resultaten från Figur 7.1 tyder på att enskilda konsultfirmor innehar personal som besitter kunskapen att modellera tryckslag i konsultbranschen, men deras respektive förmåga går inte att dra någon slutsats kring. Utifrån svaren verkar det dock finnas underlag för att tryckslagsberäkningar kan erbjudas till många VA-verksamheter i landet.

I dagsläget finns bättre tillgång till programvaror för tryckslagsberäkningar, i jämförelse med situationen på 80-talet. Det bör dock påtalas att det finns risker med de kommersiella programvarorna. Tryckslag som fenomen utgår från en relativt komplicerad teori. För att korrekt kvantifiera tryckslagens storlek krävs en ingående teoretisk bakgrund i kombination med beräkningsstyrkan i de kommersiella programvarorna. Modellörer bör därför vara medvetna om att programmen bygger på antaganden och begränsningar, som inte ska negligeras. Att enbart utföra beräkningar utan tillräcklig grundförståelse för fenomenet riskerar leda till direkt felaktiga resultat. En uppmärksamhet i branschen bör därför finnas kring att programmens utfall måste jämföras och valideras med teoretiska bedömningar. Enskilda parametrar vid tryckslagsberäkningar kan påverka beräkningsresultaten varpå det är viktigt att känslighetsanalysera sina modeller för att undvika felaktiga rekommendationer.

Något mer alarmerande är att konsultrepresentanterna till stor del uppskattade att den generella VA-konsulten inte har förmåga att lyfta frågan om tryckslagsproblematiken. Majoriteten av konsultfirmorna uppger att mindre än hälften besitter förmågan. Ett kunskapslyft krävs på konsultsidan, men orsaken till den begränsade kunskapen kan härröra till att förberedande utbildningsmöjligheter på lärosätena är begränsad. Återkopplingen från flertalet av VA-verksamheterna är att de förlitar sig på konsulternas kunskap att belysa frågan och vidta tillräckliga åtgärder, vilket studien visar inte alls är självklart. För att motverka att frågan glöms bort bör därför VA-verksamheter också sträva emot att ställa krav på konsulter att värdera risker för tryckslag i projekt för trycksatta ledningssystem.

9.3 Utbildningsmöjligheter

Utbildningsmöjligheterna inom tryckslag verkar ha minskat genom åren. Inget av de större lärosätena i landet erbjuder kurser kopplat till tryckslag i VA-system, men några berör fenomenet som ett kort delmoment inom en hydraulikkurs. Utbildningsutbudet var bättre under 1980- och 1990-talen där både Chalmers och Lunds tekniska högskola

erbjöd en enskild kurs inom ämnet. Även Linköpings tekniska högskola berörde ämnet i större omfattning. Orsaken till att kursutbudet försämrats har inte utretts i detalj inom studien. Bedömningen är emellertid att utbudet försämrats till följd av att engagerade nyckelpersoner inom ämnet har pensionerats. De enskilda kurserna som utgavs, slutade erbjudas i takt med att de avslutade sina anställningar.

Utbildningsmöjligheter på lärosäten är en förutsättning för att kunskapen ska bibehållas i branschen. Det är viktigt att VA-ingenjörer besitter förmågan att kunna uppmärksamma risker för tryckslag för att rätt utvärderingar ska kunna utföras. Denna förmåga har sannolikt försämrats i takt med att kursutbudet förändrats på lärosätena. Detta syns delvis i responsen som konsulterna gav kring att en relativt låg andel av den generella VA-ingenjören inte besitter tillräckligt med kunskap för att uppmärksamma frågan. Även möjligheten att utbilda specialister inom tryckslag har kraftigt försämrats eftersom det saknas djupgående kurser om fenomenet. Följdrisken är att den gedigna teoretiska kunskapen över tid försämras i branschen. Idealiskt bör ett samarbete kring utbildningsmöjligheter samordnas med lärosätena för att behovet i VA-branschen ska spegla vilka utbildningsmöjligheter som finns.

Fortbildningsmöjligheterna utanför den akademiska världen var också mer förekommande under slutet av 1900-talet, bland annat genom att STF ingenjörsutbildning erbjöd utbildningar. I dag erbjuds inga fortbildningsutbildningar från de centrala branschorganisationerna.

Fortbildningskurser för näringslivet bör finnas tillgängliga i syfte att sprida en bred kunskap om tryckslag i branschen. Detta kan lämpligen erbjudas via Svenskt Vattens kursprogram. Antingen som en utökning av befintliga hydraulikkurser alternativt som ny kurs med fokus på tryckslag.

Resultaten i Figur 6.6 verkar indikera att många VA-verksamheter inte beaktar ledningsprofilen i samband med projektering av trycksatta system. Förekomst av kuperade ledningsprofiler ökar behovet av att proaktivt utvärdera driftförhållanden för att minimera risker med undertryck i trycksatta ledningssystem. Allvarliga undertryck kan som tidigare nämnts generera kraftiga övertryck om fenomenet flödesseparation uppstår. Utöver flödesseparation kan risker med undertryck innefatta bildande av kaviteter, implosionsrisker, ledningar som ”sugs ihop” och insug av luft eller ovidkommande vatten. Ordentlig utvärdering av en trycksatt lednings profil reducerar även andra driftbekymmer som inte är tryckslagsrelaterade såsom varierande driftpunkter för pumpar och sedimentationsrisker. En kombinerad hydraulik- och tryckslagskurs vore därmed lämplig att erbjuda.

9.4 Jämförelse med utvärdering från 1980

Likt utredningen från Jönsson (1980) återger VA-verksamheterna att tryckslag fortfarande förekommer i ledningsnäten och branschen verkar inte nämnvärt ha förbättrat sin förståelse kring tryckslagsförhållanden. Figur 6.8 visar att ca 75 % av VA-verksamheterna har exempel på skador som härrör från tryckslag. Många uppger även att misstankar om tryckslagsincidenter finns, men att det sällan kan säkerhetsställas att tryckslag är den direkta orsaken. Allvarliga fall förekommer fortfarande, då runt en femtedel av de svarande har exempel på allvarliga incidenter.

Utvärdering av läckor är fortfarande ovanligt och VA-verksamheternas reaktiva arbete på läckor innefattar vanligen enbart att läckan lagas. En frekvent slutsats är att läckans orsak härrör till ”en dålig ledning”, varpå läckutredningen oftast stannar där. Enbart 10 verksamheter (10 %) uppgav att det förekommit reaktiva utredningar om tryckslag efter uppkomna ledningsbrott, i de flesta fall efter tydliga misstankar om tryckslag. Det speglar slutsatserna som Jönsson (1980) dragit och ingen förändring bedöms ha skett de senaste 40 åren.

Även resultaten kring verksamheternas interna dokumentation i Figur 6.3 speglar den bild som drogs år 1980. Intern dokumentation kring tryckslag och hur de ska förebyggas verkar saknas på bred basis. Det, i kombination med den sparsamma läckutvärderingen, försvårar analysen av tryckslag i VA-ledningssystemen, vilket innebär att mörkertalet kring uppkomna tryckslagsfall i ledningsnätet potentiellt undervärderas.

Ett önskemål från 1980 var en gemensam handbok för bedömning av tryckslagsrisker i ledningssystem. Det föranledde framtagandet av VAV P58, *Tryckslag i VA-anläggningar*, som publicerades 1988. Publikationen beskriver grunderna till tryckslag och belyser syftet med tryckslagsreducerande åtgärder samt exempel på när de kan implementeras. Rådande utvärdering visar emellertid att kännedomen om VAV P58 är förhållandevis låg, och de flesta VA-verksamheter uppger att den inte nyttjas även om kännedomen finns. Önskemålet var även att handboken skulle leda till förbättrad förståelse kring tryckslagsfenomenet. I dagsläget verkar den generella kunskapen kring tryckslag dock vara låg, både hos VA-verksamheterna hos konsulterna. Konsultfirmornas representanter uppskattade att ca 40 % bland deras VA-medarbetare, hade tillräcklig kunskap för att lyfta tryckslagsfrågan.

På 1980-talet upplevde VA-branschen att det inte fanns något bra tillvägagångssätt att utföra tryckslagsberäkningar då datorprogrammen var begränsade och kostsamma. Tryckslagsberäkningar kräver en gedigen teoretisk förståelse, men då beräkningarna bygger på numeriska beräkningsmetoder är datorprestanda en viktig komponent. Ju bättre prestanda, desto noggrannare beräkningar kan utföras. Under 80-talet utfördes tryckslagsberäkningar antingen med grafiska metoder, vilka var tidskrävande, alternativt med egenutvecklade program som inte nödvändigtvis var tillgängliga för den breda massan. Det innebar begränsningar vid kvantifiering av tryckslag hos konsulter och VA-verksamheter.

Dagens datorer innehar en betydligt bättre prestanda än de som var tillgängliga på 80-talet, vilket möjliggör betydligt noggrannare och mer tidseffektiva beräkningar. Därtill har flertalet kommersiella beräkningsprogram utvecklats innebärande att tillgängligheten att utföra beräkningar är avsevärt högre i dagsläget. En substantiell förbättring har därmed skett och begränsningar med hänsyn till tillgänglighet och prestanda finns inte längre i samma utsträckning.

Omfattningen av validering av tryckslagsbedömningar är sannolikt fortfarande låg för de enstaka fall där tryckslagsberäkningar utförs. Valideringarna kräver vanligen specifik utrustning, där högfrekvent loggning är önskvärt. En större andel av VA-verksamheterna (ca 2/3 enligt Figur 6.10) verkar inte ha tillgång till högupplösta tryckgivare, vilket bör användas vid styrkande av tryckslagsmodeller. Det i kombination med hur sällan läckor utvärderas innebär sannolikt att validering av modeller och uppkomna tryckslagsfall är ovanligt.

Återkopplingen från intervjuerna speglar också resultaten från Jönsson (1980), nämligen att kunskapen generellt är låg och att uppsving i branschen främst kopplas till enskilda personers intresse.

10 Slutsatser

Studiens rön är att många VA-verksamheter och konsulter bortser från tryckslagsfrågor, möjligen på grund av bristande kunskap. Det innebär att många VA-system byggs utan att risker för tryckslag har kartlagts och i många projekt dyker tryckslagsfrågan inte upp. De flesta VA-verksamheterna uppger också att läckor har uppstått till följd av verifierade eller misstänkta tryckslag. Många uppger emellertid att orsaken till uppkomna brott i ledningssystemen sällan eller aldrig utvärderas, varför omfattningen av ledningsbrott som direkt eller indirekt härrör till tryckslag är oklar.

I de fall tryckslagsreducerande åtgärder implementeras till ledningsnätet dokumenteras deras syfte sällan. Även i VA-verksamheternas befintliga ledningssystem finns enheter såsom tryckklockor och avluftningsventiler där syftet med dem är oklart. Flera exempel finns också på att dessa enheter bortkopplats utan att VA-verksamheten verifierat om de funnits i syfte att vara tryckslagsreducerande för ledningssystemet. Underhåll av enheter, i synnerhet avluftningsventiler, är bristfälligt och många VA-verksamheter uppger att de inte vet lokalisation, skick och typ på sina avluftningsventiler.

Jämförelsen med studien utförd av Jönsson (1980) tyder på en marginell kunskapsförändring kring tryckslag de senaste 40 åren. Hjälpmedlen för tryckslagsbedömning har dock utvecklats, dels har en publikation kring tryckslag framtagits (VAV P58), dels finns fler kommersiella tryckslagsprogram tillgängliga. Dessvärre, eftersom fenomenet ofta glöms bort, nyttjas dessa verktyg i begränsad omfattning.

Ett gemensamt grepp bör tas kring tryckslagsfrågan där branschens experter samlas för att utveckla ett lättillgängligt arbetssätt som VA-verksamheter och konsulter kan nyttja. Denna typ av samverkan bedöms tidigare ha saknats och de få tryckslagsexperter som finns uppges ha jobbat relativt enskilt. Resultatet av en sådan samverkan kan generera ett definierat arbetssätt kring tryckslag med stegvis arbetsgång kring när och hur omfattande tryckslagsbedömningar och/eller beräkningar bör utföras. I många situationer kommer tryckslagsriskerna kunna värderas genom övergripande resonemang och handberäkningar, men för fallen där det bedöms att risker förekommer bör mer djupgående undersökningar utföras.

Ett verktyg för initiala bedömningar av tryckslagsrisker efterfrågas av VA-verksamheterna. Förslagsvis kan detta arbetssätt införlivas i en uppdatering av VAV P58, som sedan kan nyttjas som ett verktyg av konsulter och VA-verksamheter. Många VA-verksamheter ser också fördelar med en uppdatering av VAV P58, dels med syfte att väcka frågan, men även komplettera den med nyare metoder såsom batteribackuper, frekvensomriktare, backventilsteorier osv. VA-verksamheterna önskar i den ha en konkret förenklad checklista som beslutsstöd kring hur tryckslagsfrågan ska angripas för de olika hydrauliska förutsättningarna som finns i VA-systemen.

Utbildningsmöjligheterna kring tryckslag är i nuläget begränsade. Lärosätena berör fenomenet i liten utsträckning och fortbildningskurser saknas. En samverkan mellan lärosätena och VA-verksamheterna gällande tryckslag bör initieras, dels för att kvantifiera branschens behov av god tryckslagskompetens, dels för att säkerhetsställa att kunskapen om tryckslag ska bevaras i landet. Både lärosätena och näringslivet återkopplade inom studien att tryckslagsundervisning gradvis försvunnit från agendan, samtidigt som de ser ett behov för att kunskapen finns.

I slutändan går det inte att bortse från att tryckslagshändelser, i värsta fall, kan medföra allvarliga personskador. VA-verksamheter måste därmed aktivt arbeta för att minimera risker för personal som jobbar intill trycksatta ledningssystem. Tryckslagsbedömningar kan ses som en ökad försäkring för att reducera uppkomsten av allvarliga händelser. Ett förebyggande arbete som minskar omfattningen av ledningsbrott genererar också ekonomiska fördelar, då det är kostsamt att laga läckor.

Kunskap och erfarenhet som tillgodogörs inom projektfaser måste kommuniceras till samtliga driftoperatörer för att säkerhetsställa deras arbetsmiljö. Det är också av största vikt att tryckslagsreducerande åtgärder som introduceras för att förhindra omfattande skador på ledningssystem underhålls noggrant för att säkerhetsställa att de fungerar vid uppkomst av allvarliga tryckslag.

11 Råd för framtiden

För att utveckla kunskapen och arbetsmetodiken kring tryckslagsfrågor bör nedanstående aktiviteter utföras.

VA-verksamheter

- VAV P58 är i dag väldigt tekniskt inriktad och bör kompletteras med en arbetsmetodik kring tryckslag, så att både konsulter och VA-verksamheter får ett verktyg som kan nyttjas för bedömning av vilka situationer som kräver noggrannare utvärdering. Förslagsvis utvecklas ett projekt där en arbetsgrupp bestående av landets tryckslagsexperter tillsammans med referenspersoner från VA-verksamheterna samlas, för att arbeta fram denna arbetsmetodik. Lämpligen separeras publikationen i två delar riktade mot olika mottagare. Den ena bör vara mer övergripande med syfte att verka som ett beslutsstöd för VA-verksamheter. Den andra bör vara mer teknisk och riktad till dem som utför tryckslagsberäkningar. Med en uppdatering och nylansering av VAV P58 kommer Svenskt Vatten också kunna öka medvetenheten om tryckslagsfenomenet i VA-branschen.
- VA-verksamheterna bör ställa större krav på dokumentation kring syftet med att olika enheter implementeras i ledningssystemen. På så vis får driftavdelningarna en bättre förståelse av varför avluftningsventiler, tryckklockor, ventiler etc. är utplacerade på ledningsnätet. Många VA-verksamheter behöver i större utsträckning också kartlägga sitt befintliga ledningssystem och utvärdera vad syftet är med de olika komponenterna. Även vid uppkomna läckor bör VA-verksamheterna oftare utvärdera orsaken till läckan för att bedöma om liknande händelser i framtiden kan motverkas genom annat driftbeteende. Den gemensamma parametern är att VA-verksamheterna behöver dokumentera risker, åtgärder och incidenter kopplat till tryckslag i betydligt större omfattning.

Utbildning

- En arbetsgrupp mellan VA-branschen och ansvariga för VA-kurser i akademin bör samlas för att diskutera vilken kunskapsnivå nyutbildade VA-ingenjörer bör inneha inom tryckslag. På sikt kan det generera att den generella kunskapen kring tryckslag förbättras så att branschen motverkar att fenomenet glöms bort hos framtida konsulter, entreprenörer och anställda hos VA-verksamheterna. För dem som vill förkovra sig mer och bli experter inom tryckslag bör en specialkurs inom tryckslag tillgängliggöras. Förslagsvis erbjuds denna via de överlappande samarbetena som finns mellan lärosätena, exempelvis Vattenforskarhögskolan. Denna kurs bör även finnas tillgänglig för personer som redan är utexaminerade och ute i näringslivet.
- För att dagens VA-ingenjörer ska få möjlighet till fortbildning bör även Svenskt Vatten erbjuda utbildningsmöjligheter inom tryckslag. Förslagsvis kompletteras befintliga hydraulikkurser med sessioner för tryckslag alternativt utvecklas en avancerad kurs inom hydraulik i trycksatta ledningssystem.

Referenser

Abdeldayem O.M., Ferràs D., van der Zwan S. och Kennedy M. (2021). Analysis of Unsteady Friction Models Used in Engineering Software for Water Hammer Analysis: Implementation Case in WANDA. *Water 2021, 13, 495.*

Alesand A. (2013). *Kostnader vid reparation av vattenläckor i Linköpings kommun*. Linköpings Universitet. DiVa.

Ballun J. V. (2019). Why Check Valves Slam. *Valve Magazine Winter 2019*

Bergant A., Simpson A.R. och Tijsseling A.S. (2006). Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures. 22(2), 135–171.*

Bosserman B.E. och Hunt W.A. (2008). *Pumping station design (Third edition).* Elsevier.

Büchert J. och Svensson A. (1998). *Tryckslags inverkan på vattenledningsnät*. Stockholm: Svenska Vatten- och avloppsverksföreningen.

Chaudry M.H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*, 3d edition. Springer.

Grimbäck G. och Silbersky U. (2021). *Vad kostar ett hål i gatan? Fallstudie på samhällsekonomiska kostnader för vattenläckan Studentgatan – Södra Promenaden i Malmö*. 21/00501 ISBN 978-91-519-9260-0.

Göteborgsposten (1982). Ledningsbrott utlöste skred – Östra Göteborg utan vatten. [1982-09-23]

Jung B.S., Boulos P.F., Wood D.J. och Bros C.M. (2009). A Lagrangian wave characteristic method for simulating transient water column separation. *American Water Works Association. 101(6).*

Jönsson L. och Larsen P. (1975). *Kompendium instationär strömning,* Lund.

Jönsson L. (1980). *Tryckslagproblem i VA-ledningar,* Lund.

Jönsson L. och Svensson A. (1997). *Läcksökning med hjälp av tryckslagsmätningar – Transientmetoden*. VA-Forsk rapport 1997-10.

Kiste K. (2022). Transienter i VA-ledningsnät – En statusbedömning för VA-Sverige. *VATTEN–Journal of Water Management and Research 78: 3. 2022.*

Larock B.E., Jeppson R.W. och Watters G.Z. (2000). *Hydraulic of pipeline systems*. CRC Press LCC.

Malm A., Horstmark A, Larsson G., Uusijärvi J., Meyer A. och Jansson E. (2011). *Rörmaterial i svenska VA-ledningar – egenskaper och livslängd*. SVU-rapport 2011-14 rev 2. Stockholm: Svenskt Vatten.

Odhiambo M., Viñas V., Sokolova E. och Pettersson T. (2023). Health risks due to intrusion into the drinking water distribution network: hydraulic modelling and quantitative microbial risk assessment. Environmental Science: *Water Research & Technology, Issue 6, 2023.*

Simpson A. (2019). IAHR Online Short Course on Transient Flows: from Theory to Practice. Angus Simpson – Water hammer control methods and modelling.

SmartValveTM (2022). Reducing pressure transients (water hammer) through the implementation of SmartValve. https://smartvalve.co.uk/wp-content/uploads/2022/10/2022-10-SMARTVALVE-BENEFITS.pdf [2024-05-20]

SurgeView™ (2017). Make your water network surge free reduce water loss. https://cspower.com.my/sabah/wp-content/uploads/2017/08/Visenti-SurgeView-Brochure.pdf [2024-02-13]

Sydney Water (2021). Engineering Competency Standard. https://www.sydneywater.com.au/content/dam/sydneywater/documents/engineering-competency-standard.pdf [2024-02-28]

Sydney Water (2022). Transient Analysis Guideline. https://www.sydneywater.com.au/content/dam/sydneywater/documents/transient-analysis-guideline.pdf [2024-02-28]

Syrinix (2017). Pipeminders - Essential pressure and flow logging for transformed network management. https://www.syrinix.com/us/ [hämtad 2024-01-15]

Svenskt Vatten (2021). *VAV P115 Rengöring av vattenledningar och reservoarer*. Stockholm: Svenskt Vatten.

VAV (1988). *VAV P58 – Tryckslag i VA-anläggningar*. Stockholm: Svenska Vatten- och avloppsverksföreningen.

VAV (1995). *Renovering av avloppsledningar. Riktlinjer för metodval, dimensionering och utförande*. Stockholm: Svenska Vatten- och avloppsverksföreningen.

Wan W. och Mao X. (2016). Shock wave speed and transient response of PE pipe with steel-mesh reinforcement. *Shock Vib. 2016(5):1–10*.

Weston S.L, Collins R.P. och Boxall J.B. (2021). An experimental study of how hydraulic transients cause mobilisation of material within drinking water distribution systems, *Water Research, Volume 194, 2021, 116890*.

Wood D., Lingireddy S., Boulos P. F., Karney B.F. och Mcpherson D.L. (2005). Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems. *American Water Works Association 97(7):104–115*.

Wylie E.B. och Streeter V.L. (1978). *Fluid Transients*. McGraw-Hill Inc.

Zhang Z. (2020). *Hydraulic Transients and Computations*. Springer.

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma
BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma
TELEFON 08-506 002 00
E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se