

TRANSIENTER I VA-LEDNINGSNÄT – EN STATUSBEDÖMNING FÖR VA-SVERIGE

TRANSIENTS IN WATER- AND WASTEWATER PIPE SYSTEMS – AN ASSESSMENT FOR SWEDEN



Kristofer Kiste

*WSP Sverige AB, Bredgatan 7, 252 25 Helsingborg och institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, Box 118, 221 00 Lund
E-mail: kristofer.kiste@wsp.com*

Abstract

Unintentional or planned operations of valves and pumps create pressure waves, called transients, which travel through pipe systems with the risk of, among other things, breakage and fatigue. Knowledge about transients in pipes and associated effects are not new. The problems with transients in Sweden were elucidated in a report published in the 1980s, where several municipalities reported examples of pipe damage created by transients. With the aim of performing a follow up on the conclusions from this report, an overall survey was conducted to assess if problems and handling of transients have changed. The survey was carried out in the spring of 2021 and sent to seven of the larger water- and wastewater authorities in Sweden, where an assessment of the status on transient management was requested. For reasons of comparison, the survey contained similar questions as the survey from the 1980s. Results show that the problem with transients still exists for the authorities. Examples include injury among the operation staff, when hit by a valve detached from the piping system. Another example involves a flooded booster pumping station for fresh water. In total, all of the authorities provided examples of pipe bursts originating from transient events, indicating room for improvement. However, the authorities are familiar with the problem and stand positive to future cooperation in research and development projects within the field of transients.

Keywords: Transients, Water Hammer, Pressure Waves, Cavitation, Flow separation, Ram pump, Mantis shrimp

Sammanfattning

Ofrivilliga eller planerade driftförändringar av ventiler och pumpar initierar tryckvågor, kallade transienter, som utbreder sig i ledningssystem med följdrisker för bland annat brott och utmattning. Kunskapen om uppkomst av transienter i ledningssystem och deras effekter är inte ny. Problemet i Sverige belystes i en rapport på 1980-talet där flera kommuner uppgav exempel på skador som uppstått till följd av transienter. I syfte att följa upp de slutsatser som drogs på 80-talet, har en översiktlig kartläggning genomförts för att bedöma om transienthanteringen och -problematiken förändrats. En enkät skickades under våren 2021 till sju större VA-bolag i landet, där en statusbedömning av arbetet med tryckslag efterfrågades. För jämförbarhetens skull utformades enkäten med likartade frågor som ställdes i enkäten från 1980-talet. Resultaten visade att det fortfarande uppstår problem hos ledningsägarna till följd av transienter, inkluderat ledningsbrott. I enstaka fall har konsekvensen blivit personskador hos driftpersonal som träffats av en ventil som flög ut från rörsystemet. Ett annat exempel innefattar en dränkt tryckstegringsstation till följd av ett brustet rör. Samtliga ledningsägare uppgav exempel på ledningsbrott till följd av transienter med varierande skadekonsekvenser, vilket visar att det fortfarande krävs mer kunskap inom området. VA-bolagen är dock bekanta med problemet och ställer sig positiva till framtida samarbeten genom forsknings- och utvecklingsprojekt beträffande transienta förhållanden.

Inledning

Rådande trend hos kommuner och kommunala VA-bolag är att det sker en centralisering av behandlingssystemen för vatten och avlopp. Flera vatten- och avloppsreningsverk byggda på 1960- och 1970-talet börjar bli utjänta och i behov av omfattande renoveringar. Behandlingsprocesser utvecklas och VA-bolag ser synergieffekter med att centralisera sin rening. Verksamheter och driftpersonal kan samlas vid en lokalisering och mer avancerade behandlingsprocesser kan motiveras kostnadsmässigt. Investeringskalkyler visar att det allt oftare blir mer kostnadseffektivt att avveckla verk och istället bygga långa överföringsledningar till gemensamma behandlingsanläggningar.

Längre trycksatta överföringsledningar ger ökade bekymmer med instationära strömningsförhållanden, även kallat transienter eller populärt tryckslag. Transienter uppstår vid snabba hastighetsförändringar, vilka initierar tryckvågor som fortplantas med höga utbredningshastigheter, ofta över 1000 m/s. Historiskt har pumpledningar varit kortare innebärande att reflekterade tryckvågor (med omvänt tecken) återkommer innan höga tryck byggs upp, eftersom vågornas periodtid understiger ventiler och pumpars stängningstider, vilket dämpar magnituden på tryckslagen. 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.

Transienter riskerar att skapa brott- och utmattningsproblem i ledningssystemet, vilket innebär ökade kostnader för ledningsrenovering. I värsta fall kan brotten leda till personskador. Över- och undertrycken som skapas vid driftförändringar behöver kvantifieras redan vid projekteringen, för att korrekta skyddsåtgärder ska kunna tillämpas i ledningssystemet.

Problemen med transienter belystes i en serie rapporter utförd av Lennart Jönsson vid Lunds Tekniska Högskola under 1970-80-talet (Jönsson och Larsen, 1975; Jönsson 1980; Larson och Jönsson, 1985). I en sammanfattande rapport beskrevs problematiken samtidigt som en statusbedömning

efterfrågades hos VA-ledningsägarna för att bedöma hur utbrett problemet var (Jönsson, 1980). Rapporten presenterade ett antal slutsatser och rekommendationer för framtida förebyggande och hantering av transienter.

I syfte att utvärdera om arbetet med transienter förbättrats sedan 1980-talet, har en ny statusbedömning genomförts under våren 2021. Uppföljningen utfördes genom att utforma en likartad enkät som den Jönsson (1980) genomförde. Enkäten distribuerades till sju större VA-bolag i sydvästra och nordöstra Sverige. De erhållna svaren jämfördes därefter med svaren från Jönssons rapport från 1980 för att sammanställa slutsatser om vad som förändrats de senaste 40 åren. Utöver sammanställningen presenterar artikeln även en kort genomgång av tryckslagsfenomenet och en översiktlig fysikalisk beskrivning.

Transienter har inte bara negativ inverkan utan det finns även tillfällen där man utnyttjat dem för att uppnå tekniska fördelar, till exempel i en vädurspump. Även i naturen förekommer det att transienter utnyttjas på ett positivt sätt, exempelvis hos mantisräkan som använder transienter som jaktgenskap.

Bakgrund och teori

Konventionellt dimensioneras trycksatta rörsystem utifrån ett antal på förhand definierade driftfall. Beräkningarna utgår då från stationära förhållanden, vilket definitionsmässigt innebär att systemet inte förändras över tid. Mellan olika stationära förhållanden finns det en övergångsfas, definierat som transienta förhållanden, där en stationär beskrivning av strömningen inte är tillräcklig (Chaudry, 2014). Transienta förhållanden initieras när ett stationärt tillstånd rubbas antingen av en planerad eller oavsiktlig förändring. Fluktuerande tryckvågor skapas av den initierade hastighetsförändringen, vilka fortplantar sig genom rörsystemet. Om skillnaden mellan de två driftsituationerna är stor samt övergången abrupt, innebärande en signifikant momentan hastighetsförändring, skapas tryckvågor med betydande över- och undertryck som fortplantas i rörsystemet.

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 singularförluster i systemet. De initiala över- och undertrycken som uppstår i systemet behöver kvantifieras för att undvika ledningsskador.

Fysikalisk konsekvens av transienter

Transienterna kan på olika sätt åsamka skador på ledningar. Vågrörelsen som initieras i ledningssystemet reflekteras och transmitteras vid krökar, reservoarer, ventiler etc., något som skapar en okontrollerad vågutbredning med risk för överlagring av positiva tryckvågor. Det resulterande övertrycket adderas till det stationära trycket i systemet och skadliga tryck kan uppstå.

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

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_v}{\rho_v}}{1 + \frac{E_v}{E_{rör}}} \cdot \frac{D}{e} \cdot C}$$

där E_v är elasticitetsmodul för vätskan, ρ_v är vätskans densitet, $E_{rör}$ är elasticitetsmodul för vatten, D är rördiametern, e är rörets vägg tjocklek och C är en konstant som beskriver hur röret är förankrat. För PE-ledningar ligger vågutbredningshastigheten kring 400 m/s (Wan och Mao, 2016) medan för ställedningar ligger hastigheten kring 1000 m/s (Bossermann och Hunt, 2008).

Sambandet mellan trycket (H) vågen skapar i relation till vågutbredningshastigheten (a) och hastighetsförändringen (Δv) ges av Joukowski's ekvation (Wylie och Streeter, 1978):

$$\Delta H = \pm \frac{a \Delta v}{g}$$

Joukowski's ekvation är tillämplig för bedömning av både över- och undertryckets magnitud. Ekvationen är lämplig att använda för en initial bedömning av tryckslagsriskerna. Härledning av ekvationen baseras på en momentan hastighetsförändring där inga reflekterade vågor påverkar förloppet, vilket innebär att trycket representerar ett högsta värde. Uppskattningen är därmed att anse som konservativ.

Undertrycken som uppstår till följd av de negativa tryckvågorna riskera också att skada ledningssystemet. Den negativa tryckvågen skapar en lokal trycksänkning, vilken kan förånga vätskan eftersom vätskans ångbildningstryck riskerar understigas. Detta skapar kavitationsbubblor och potentiellt vakuumförhållanden. När de bildade bubblorna åter utsätts för ett statiskt tryck imploderar de med konsekvens att en kraftig jetstråle uppkommer som skadar insidan av rörväggen. Jetstrålens hastighet är hög, ibland upp mot 50 m/s (Jönsson, 1975). Den nya hastighetsförändringen, skapat av den imploderade kavitationsbubblan, är avsevärt större än den initiala hastighetsförändringen när tryckvågen skapades. De nya tryckvågorna till följd av impllosionen har därmed ännu högre magnitud och kraftiga övertryck kan uppstå.

Om förångningen är utbredd, riskerar negativa tryckvågor skapa fullt vakuum vid lokala högpunkter i ledningssystem. Det kan leda till ett fenomen kallat flödesseparation, innebärande att två eller flera flödesmassor separeras fullt ut, åtskilda av vakuum (Bergant m.fl., 2006). De separerade flödesmassorna innehar fortfarande rörelseenergi, med riktning från varandra. Emellertid reflekteras flödesmassorna vid respektive änd- eller reflektionspunkter. När flödemassorna åter möts har de motriktade hastighetsvektorer, något som medför en förhöjd hastighetsdifferens och tryckslagen ökar därmed ytterligare.

En annan negativ aspekt när kavitationsbubblor och vakuum bildas är att en mängd luft initieras i ledningen. Ansamlas denna luft skapas lokala luftfickor som innebär ökade singularförluster vid stationära förhållanden med försämrade flödeskapacitet, men även risk för kraftiga tryckslag när luftfickorna kollapsar.

Grundläggande ekvationer

Den matematiska beskrivningen av instationära strömningsförhållanden härleds från de grundläggande ekvationerna för fysikalisk beskrivning av vätsketransport, nämligen kontinuitetsekvationen och rörelsemängdsekvationen. Instationär strömning varierar både i tid och rum (längs röret), där de beroende variablerna, tryck och hastighet, bestäms av två partiella differentialekvationer som i allmänhet inte är lösbara analytiskt:

Kontinuitetsekvationen

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

Rörelsemängdsekvationen

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2gD} = 0$$

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 m.fl., 2000; Jönsson, 1975). Olika numeriska beräkningsmetoder utnyttjas för att lösa ekvationerna, vilket numera utförs med kraftfulla modelleringsprogram. De vanligaste numeriska beräkningsmetoderna är karakteristikmetoden (MOC) och vågmetoden (WCM), där de flesta kommersiella modelleringsprogram utgår från endera metod. Skillnaden mellan metoderna avser främst hur beräkningarna mellan randvillkoren utförs (Jung m.fl., 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).

Utöver de ovan beskrivna differentialekvationerna krävs matematiska beskrivningar av olika typer

av randvillkor såsom pumpar, ventiler, avluftningsanordningar, hydroforer etc. För beräkningarnas resultat är det kritiskt att randvillkoren definieras korrekt utifrån vedertagna teorier. Eftersom teorierna utgår från ett antal antaganden och förenklingar, är gedigen kunskap och förståelse nödvändig hos modellerare.

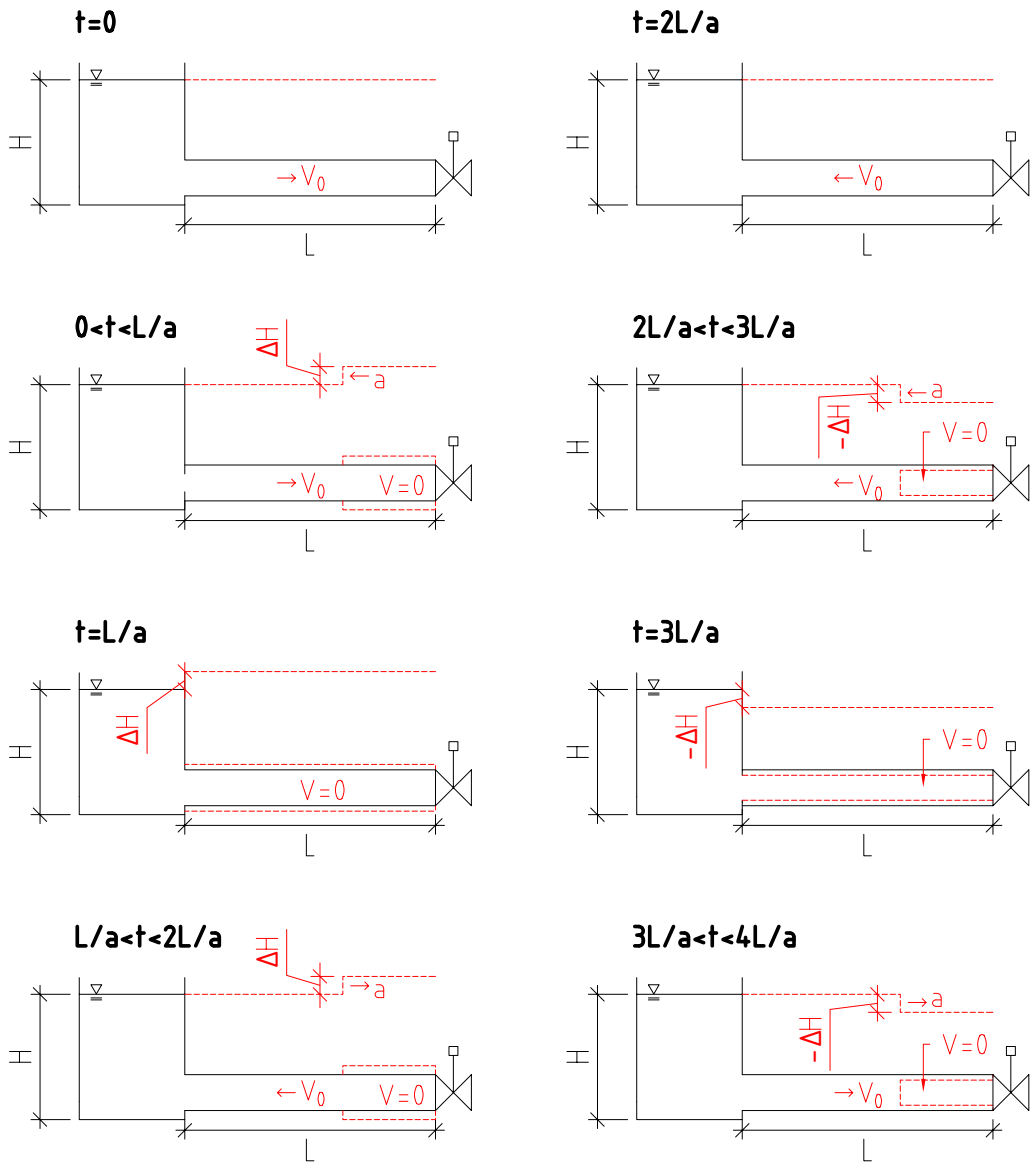
Grundläggande tryckslagsförlopp

Det grundläggande tryckslagsförloppet kan åskådliggöras med nedanstående exempel som utgår från en reservoar ansluten till en ledning som avslutas med en avstängningsventil, se Figur 1. Ventilen är vid tiden $t = 0$ fullt öppen vilket innebär att hastigheten (V_0) är riktad mot ventilen eftersom reservoaren bidrar med en statisk trycknivå H . Liknande exempel beskrivs i litteraturen (Jönsson 1975; Wylie och Streeter, 1978; Chaudry, 2014; Larock m.fl., 2000).

Förloppet startar med att ventilen stängs (vid $t = 0$) och i exemplet förutsätts det att ventilen omedelbart går från fullt öppet läge till stängt läge (i.e., momentan stängning).

Efter ventilstängning ($t > 0$) är hastigheten (V) vid ventilen 0. Den dynamiska energin i vattnet från V_0 kan inte behållas när ventilen nås, varpå den övergår i en annan energiform nämligen elastisk eller statisk energi. Beroende på hur mycket rörmaterialet kan expandera upptas en viss del som elastisk energi medan resterande energi övergår till statisk energi, dvs. ett ökat tryck i ledningen (ΔH). Omvandlingen av dynamisk energi till elastisk och statisk energi utbreder sig som en våg, med vågutbredningshastighet a , genom ledningen riktad mot reservoaren.

När vågen nått reservoaren, vid $t = L/a$, är hastigheten i hela ledningen 0. Det statiska trycket i ledningen ($H + \Delta H$) överstiger då det statiska trycket i reservoaren (H), varpå det föreligger en statisk nivåskillnad mellan ledning och reservoar som systemet önskar utjämna. Eftersom trycknivån i reservoaren bibehålls, sker en reflektion av tryckvågen med omvänt tecken. En flödestransport sker därmed från ledningen till reservoaren vilket initierar en hastighet i samma riktning. Under tiden $L/a < t < 2L/a$ utbreddes en våg (a) genom ledningen som



Figur 1: Det principiella tryckslagsförloppet för ett system med en reservoar i ena änden och en ventil som stängs momentant i andra änden.

utjämnar tryckdifferensen ΔH samtidigt som hastigheten V_0 , med riktning mot reservoaren, erhålls i ledningen.

Statisk jämvikt har uppnåtts vid tiden $t = 2L/a$. Denna situation liknar situationen med $t = 0$, med skillnaden att hastigheten är riktad mot reservoaren. Hastigheten vid ventilen är fortsatt 0 varpå energin i V_0 behöver övergå i elastisk eller statisk energi. Vid tiden $t > 2L/a$ uppstår därmed ett undertryck i ledningen ($-\Delta H$) samt en eventuell kontraktion av ledningen. Undertrycksvågen utbreder sig med en vågutbredningshastighet (a) riktad mot reservoaren. Vågen reflekteras följaktligen vid ventilen med samma tecken.

Vid tiden $t = 3L/a$ är trycket i ledningen ($H - \Delta H$). Återigen uppstår en statisk nivåskillnad mellan reservoar och ledning, men denna gång med lägre tryck i ledningen. Efter reflektion av tryckvågen med omvänt tecken uppstår en flödestransport från reservoaren till ledningen, varpå en hastighet riktad mot ventilen initieras. Efterhand som hastigheten V_0 utbreder sig över ledningen blir trycket i ledningen H .

Vid tiden $t = 4L/a$ är tryckslagsförloppet fullbordat och situationen är densamma som vid $t = 0$. Cykeln för tryckslagsförloppet repeteras därefter. Följaktligen är perioden för den transienta vågen $T = 4L/a$, vilken går under benämningen rörets periodtid.

Exemplet utgår från att inga friktionsförluster sker i ledningen. I verkliga system, där friktionsförluster är förekommande, dämpas storleken på tryckvågen och hastigheten V_0 efterhand. Slutligen uppnås ett tillstånd med hastigheten 0 och trycket H överallt i röret.

Transientbedömning

Historiskt sett har teorin bakom transienter funnits sedan början av 1900-talet (Chaudry, 2014). Beräkning av avancerade system har emellertid begränsats av att ekvationerna kräver numerisk lösning, vilket gjort beräkningarna tidskrävande. Initialt nyttjades en grafisk metod för lösning av differentialekvationerna (Jönsson och Larsen, 1975), men denna metod har under slutet av 1900-talet ersatts av datorprogram.

Genomförandet av detaljerade transienta beräkningar för komplicerade ledningssystem är numera möjligt eftersom datorkraft i samma grad inte är begränsande som under 1900-talet. Ledningsägare har därmed bättre förutsättningar att modellera olika driftscenarion, för bedömning av vilka transienta förhållanden som kan uppstå. Både vid utredning av befintliga ledningssystem och projektering bör de transienta förutsättningarna bedömas för att minska skador och utmattning av ledningar.

I utredningen utförd av Jönsson (1980) uppkom önskemål från konsulter och ledningsägare om tillgång till mer generella datorprogram för tryckslagsberäkning. Möjligheten för avancerad modellering av tryckslagsproblem finns i dagsläget med fler kommersiella program tillgängliga, varpå ledningsägare har möjlighet att utveckla bättre kunskap om sina ledningssystem. Med de förbättrade förutsättningarna för modellering av transienter borde flera av de problem som belyses av Jönsson (1980) kunnat reducerats eller helt elimineras. En uppföljning för att undersöka om så är fallet har utförts i form av en enkät till utvalda VA-bolag.

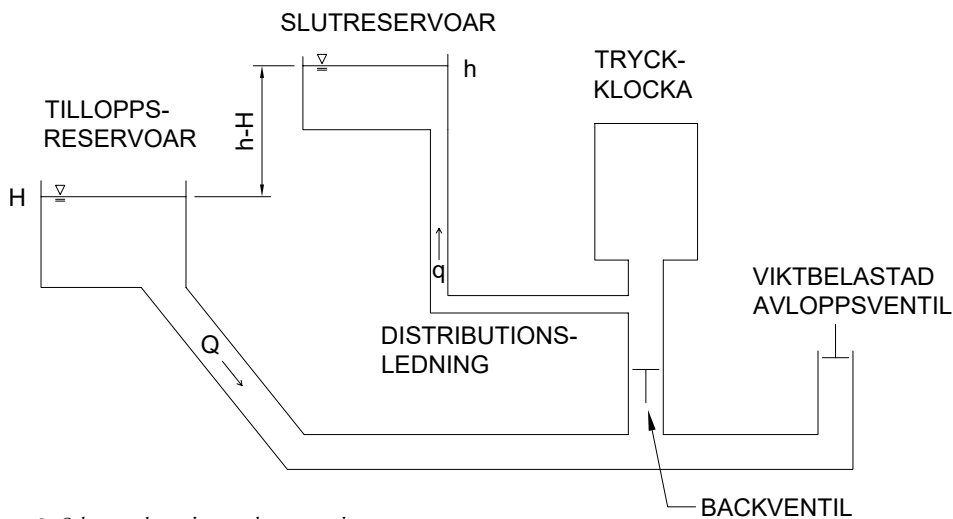
Positiva exempel av tryckslag

Samhället, liksom naturen, har i vissa fall utvecklats så att transienter används fördelaktigt. Nedan följer två intressanta exempel på sådant nyttjande av transienter, nämligen vädurspumpen för uppföring av vatten och mantisräkans teknik för att fånga sitt byte.

Vädurspump

En vädurspump är en enkel konstruktion, i huvudsak bestående av en backventil och en viktbelastad avloppsventil (Zhang, 2020). Vädurspumpen kräver ingen mekanisk energitillförsel utan kan enbart drivas genom en rörelseenergi i vattnet som kan användas för att förflytta ett litet vattenflöde (q) till en reservoar med högre potentiell energi (h), se Figur 2.

Vädurspumpen består av en inkommande ledning som förgrenas åt två håll, den ena för bortledning av överskottsvatten och den andra till distributionsledningen (Fatahi-Alkhouhi et. al, 2019). Distributionsledningen är utrustad med en back-



Figur 2: Schematisk uppbyggnad av en väderspump.

ventil och avloppsledningen med en viktbelastad avloppsventil. Initialt är avloppsventilen öppen. När vatten (Q) tillförs från tillloppsreservoaren rinner vattnet först runt avloppsventilen men efterhand som flödet ökar, uppstår ett ökat motstånd mot den viktbelastade avloppsventilen varpå den stängs abrupt. Den momentana ventilstängningen omvandlar rörelseenergi till statisk energi och en tryckvåg fortplantas tillbaka i ledningen mot backventilen på distributionsledningen. Backventilen öppnas därmed och en mindre mängd vatten (q) tillförs distributionsledningen under en kortare period. Denna cykel repeteras kontinuerligt, vilket över tid genererar förflyttning av stora mängder vatten över en vertikal sträcka (h). Väderspumpen utrustas normalt med en tryckklocka för att undvika att pumpen skadas av de initierade över- och undertrycken.

Mantisräkan

Även i naturen finns det exempel där transienter utnyttjas av djur för att skaffa sig fördelar. Mantisräkan, till exempel, som förekommer i de flesta varmare hav i världen, har utvecklat en jaktegenskap som är baserad på transienter.

Mantisräkan har en klubbformad klo som den använder till att slå mot sitt byte med en mycket hög acceleration. Studier har visat att slaget på

går några millisekunder, med en hastighet som överstiger 20 m/s och en acceleration på 10 000 m/s² (Patek m.fl., 2004). Accelerationen uppnås genom att räkan spänner sin klo med en fjädrande anordning innan slaget (Patek och Caldwell, 2005). Eftersom hastighetsdifferensen är stor, och ändringen momentan, skapas utöver kraften slaget ger en negativ tryckvåg som understiger vattnets ångbildningstryck och kavitationsbubblor skapas. När kavitationsbubblorna åter utsätts för havets statiska tryck, imploderar de vilket skapar tryckvågor med höga övertryck. Mantisräkans byte får därmed utstå två olika ”slag”, först det faktiska slaget från själva klon och därefter övertrycken från de imploderade kavitationsbubblorna.

Enkät, metodik och resultat

Under våren 2021 skickades en enkät till ett antal VA-bolag för att bedöma hur utbredda problemen är beträffande skadliga transienter i ledningssystem. Syftet var att utföra en statusbedömning av nuläget avseende hur VA-huvudmännen arbetar med att reducera riskerna för skadliga tryckslag. Enkäten avsåg även vara en uppföljning till den enkät, utförd på 1980-talet av Lennart Jönsson vid Lunds Tekniska Högskola (Jönsson, 1980).

I enkäten deltog 7 st. kommunala VA-bolag i sydvästra samt nordöstra Sverige (VA SYD, NSVA,



LBVA, VIVAB, Göteborg kretslopp och vatten, VAKIN och MIVA). Flera av de tillfrågade upplevde att det var svårt att svara på frågorna då det fanns knapphändig dokumentation, varpå flera svar härrör från vad ”man hört” i korridorerna. Frågor och svar från VA-bolagen är sammanfattade nedan.

1. Vilka skador har uppstått på VA-ledningssystemet (rör, ventiler, pumpar, mätare etc) p.g.a förmodade eller påvisade transienta strömningsförlopp?

Samtliga ledningsägare har kännedom om ledningsbrott som skapat läckor. Två av ledningsägarna har exempel på händelser av mer allvarlig karaktär, citerade enligt nedan.

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

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

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

Enkätsvaren visar att tillbud och olyckor förekommer till följd av felaktigt dimensionerade rörsystem som brister vid transienta händelser. Även olyckor till följd av bristfällig förmedling och information till drifttekniker har inträffat.

Ett annat bekymmer som poängteras är att det är svårt att påvisa att incidenterna skett till följd av transienter. I många fall misstänker ledningsägarna att incidenten kan hänföras till tryckslag, men eftersom ledningssystemen inte är utrustade med högupplösta tryckgivare är det svårt att säkerställa att så är fallet. Förbättrad loggning av trycket med tätare frekvens skulle ge mer kunskap om förekomsten av tryckslag i ledningssystemen.

Svaren visar även att transienterna ger följdkonsekvenser såsom vattenkvalitetsproblem till följd av biofilm som släpper från innerväggar på ledningar och utlösta säkerhetsventiler.

2. Kan ni beskriva omständigheterna kring det transienta förloppet (trolig orsak, ledningsnätets konfiguration, vattenhastigheter och andra upplysningar som kan vara väsentliga för händelsen)?

Orsaken till de flesta tryckslagen är hastiga ventilmanövreringar framförallt vid ventilstängning samt abrupta pumpförändringar vid direktstart av pumpar eller strömavbrott. Även kraftigt förändrade uttag vid exempelvis bränder och fyllning av pooler nämns som orsak. En ledningsägare nämnde att det vid ett enskilt fall förekom hastigheter kring 8 m/s i ledningssystemet.

Flera ledningsägare uppger att de inte kan beskriva omständigheter kring de transienta förloppen, alternativt att dessa detaljerade uppgifter saknas. Det indikerar bristfällig dokumentationen både med hänsyn till uppföljningen av förloppen, men även vilka lärdomar som dragits för att förhindra att det sker på nytt.

3. Vilken omfattning och vilka följder fick skadorna? Eventuella åtgärder för att förhindra händelserna i framtiden?

De vanligaste åtgärderna, utförda efter påvisade tryckslag, är att ventiler programmerats med mjukare stängningsförlopp, alternativt har hävarm och motvikt eftermonterats på backventiler. Även pumpar har utrustats med frekvensomriktare för mjukare start- och stängningsförlopp. Vissa ledningsägare uppger även att de utrustat ledningssystemen med mitigerande åtgärder såsom hydroforer.

Utökad underhåll nämns också i ett enkätsvar. Oavsett hur väl projekterat ledningssystemet är med hänsyn till transienter kräver tryckslagsreducerande åtgärder underhåll. Det är viktigt att redan vid driftsättning ta fram en underhållsplan som ska efterföljas.

4. Uppträder onormala eller oförutsedda trycktransienter vid vissa specifika drifttillstånd?

Samma svar som presenterade under fråga 2 gavs för denna fråga.

5. Vilka är de vanligaste orsakerna till större flödesförändringar i VA-systemet? Hur ofta uppstår dessa?

Det råder en viss konsensus kring att de vanligaste orsakerna till flödesförändringar är vid brandvat-

tenuttag, vattenläckor, sprinkleruttag och snabba ventilstängningar. Flera av dessa orsaker uppstår till följd av medvetna val där andra problem behöver lösas såsom bränder, läckor etc. Ventilstängningen eller uttaget behöver utföras snabbt, men i dessa situationer är det viktigt att driften har en förståelse över vilka risker och faror som finns med att initiera tryckslag i systemet. Även vid projektering behöver dessa scenario modelleras för att undvika person- och egendomsskador vid dessa krissituationer.

Även storförbrukare nämns som orsak till större flödesförändringar. Här krävs det att VA-bolagen har en tydlig kommunikation mot storförbrukarna så de är informerade om vilka konsekvenser det kan få för deras och VA-bolagens ledningssystem.

6. Vilka maximal vattenhastigheter kan föreligga i rörsystemet?

De flesta VA-huvudmän har inga definierade högsta vattenhastigheter i systemen alternativt saknades den uppgiften i enkätsvaren. Några uppgav att de i huvudsak undviker att överstiga 1,0-1,5 m/s i dricksvattenledningsnätet. Emellertid föreligger det vissa driftsituationer som överstiger denna tumregel.

7. Har man i loggdata för befintliga givare/mätare kunnat utläsa magnituden av de momentana tryckförändringarna vid de tillfällen man påvisat transienta förlopp?

De allra flesta ledningsägarna loggar inte transienter på kontinuerlig basis eftersom de fastmonterade tryckgivarna saknar lämplig loggningsfrekvens för att kunna utläsa transienter. Ungefär hälften hade kännedom om att fanns portabla mätare med högre loggningsfrekvens som kunde nyttjas vid behov.

8. Har ni ett intresse att i någon form vara delaktig som samarbetspartner i framtida forskning- och utvecklingsprojekt inom instationära strömningsförhållanden, exempelvis genom Svenskt Vatten utvecklingsprojekt eller liknande?

5 av 7 svarar tydligt ja och resterande 2 är försiktigt intresserade.

Jämförelse med slutsatser från enkät på 1980-talet

Svaren från den nu genomförda enkäten bör jämföras med slutsatserna från enkäten utförd på 1980-talet. Nedan följer några sammanfattade slutsatser från den senare enkäten (Jönsson, 1980).

- 13 av 33 kommuner rapporterade skador och olägenheter förorsakade av trycktransienter där orsaken huvudsakligen var ventilmanövrering och pumpstopp/-start.
- Dokumentationen är i många transienta skadefall knapphändig varför flödesförhållandena vid skadetillfället är okända.
- Önskemål om förbättrade datorprogram för beräkning av trycktransienter till en rimlig kostnad.
- Kommuner, konsulter och tillverkare framförde önskemål om mer omfattande jämförelse mellan beräknade och i fält uppmätta trycktransienter.
- Ett starkt behov föreligger om framtagande av en gemensam handbok med beskrivning av tumregler för att möjliggöra en första överslagsmässig bedömning av tryckslagsrisker.

De två enkäterna utformades med likartade frågor. Jämförs resultaten från enkäterna, framgår det att liknande bekymmer föreligger fortfarande - 40 år senare. Olägenheter till följd av ventilmanövreringar, strömavbrott, pumpar med start-/stoppfunktion är fortfarande förekommande och leder till rörbrott- och utmattningar. Sannolikt krävs ett generellt kunskapslyft i alla led, hos såväl ledningsägare, driftpersonal och konsulter för att reducera den skadliga åverkan transienter kan medföra.

Även dokumentation av uppkomna incidenter verkar vara bristfällig eftersom flertalet av VA-bolagen hade svårt att hitta information rörande transienta händelser. En noggrannare bedömning och utvärdering av uppkomna fall bör dokumenteras för att undvika framtida skador.

Trots utbudet av mer avancerade givare som ger möjlighet att detektera tryckvågor verkar det fortfarande inte ske sådana mätningar i någon större omfattning. Speciella givare med högfrekvent loggning används följaktligen sällan. En högre andel fast monterade givare med högfrekvent loggning vore önskvärt på ledningsnäten, med återkoppling till överordnade driftsystem. Modeller skulle därmed kunna kalibreras mot verkliga förhållanden så att VA-huvudmännen kan förebygga driftproblem i större utsträckning.

Ett område som förbättrats sedan enkäten på 1980-talet är att modelleringsprogram är tillgängliga i högre grad med liten begränsning beträffande datorkapacitet. Avancerade transienta beräkningar är möjliga att genomföra med de kommersiella programvaror som finns tillgängliga. Viktigt är emellertid att ha en förståelse för bakgrunden till programmen och dess begränsningar, samt att korrekt schematisera ledningsnät och formulera randvillkor, för rätt tolka resultat och därigenom utveckla lämpliga metoder för att reducera transienter.

Från enkäten på 1980-talet framfördes önskemål om framtagande av en handbok för översiktlig bedömning av riskerna med transienter. Detta uppfylldes och resulterade i publikation VAV P58 (Svenska Vatten och avloppsverksföreningen, 1988). Enstaka delar kan behöva uppdateras i VAV P58, men för en översiktlig riskbedömning är den fortfarande användbar.

Slutsats

Flera slutsatser som drogs i enkäten av Jönsson (1980) från 1980-talet är fortfarande gällande idag. Trots förbättrade möjligheter till modellering och utvecklade ventiler/pumpar med tryckslagsreducerande möjligheter, uppstår likartade bekymmer med skadliga transienter hos ledningsägarna än idag. VA-bolagen har fortfarande begränsad möjlighet till att detektera transienterna, eftersom det kräver mer avancerade givare. Det finns förbättringspotential i hantering och dokumentation av uppkomna transienter, något som kunnat möjliggöra en förbättrad kunskap och uppföljning så att framtida skador kan undvikas. Sannolikt be-

höver kunskapen med transienter lyftas i alla led (projektorganisation, konsulter, driftoperatörer) och riskerna bör utvärderas vid samtliga ny- och ombyggnationer. I enkäten svarade 5 av 7 tillfrågade VA-bolag att de hade starkt intresse för att vara framtida samarbetspartners vid forskning- och utvecklingsprojekt som främjar förståelsen och hanteringen av skadliga transienter.

Litteratur

- Bergant, A., Simpson, A.R., Tijsseling, A.S. (2006) Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures*. 22(2), 135-171.
- Bosserman, B.E., Hunt, W.A. (2008) *Pumping station design* (Third edition). Elsevier.
- Caldwell, R.L. (2008). Department of Integrative Biology, University of California, Berkeley. https://www.nsf.gov/news/mmg/mmg_disp.jsp?med_id=62726&from=img
- Chaudry, M.H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*, 3d edition. Springer.
- Fatahi-Alkouchi, R., Lashkar-Ara, B., Keramat, A. (2019) On the measurement of ram-pump power by changing in water hammer pressure wave energy, *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 681–693.
- Hamill, L (2001) *Understanding Hydraulics*, Second edition. Palgrave.
- Jung, B.S., Boulos, P.F., Wood, D.J., Bros, C.M. (2009) A Lagrangian wave characteristic method for simulating transient water column separation. *Journal - American Water Works Association*. 101(6).
- Jönsson, L och Larsen, P (1975) *Kompedium instationär strömning*, Lund.
- Jönsson, L (1980) *Tryckslagproblem i VA-ledningar*, Lund.
- Jönsson, L., Svensson, A. (1997) *Läcksökning med hjälp av tryckslagsmätningar – Transientmetoden*. VA-Forsk rapport 1997-10.
- Larock, B.E., Jeppson, R.W., Watters, G.Z. (2000) *Hydraulic of pipeline systems*. CRC Press LLC.
- Larson, M., Jönsson, L. (1985) *Trycktransienters inverkan på VA-ledningar*, Lund.
- Nnene, O., Okoye, I., Agunwamba, J. (2009) *Design and Construction of a Water Conservation System*. University of Nigeria Nsukka.
- Patek, S.N., Caldwell, R.L. (2005) Extreme impact and cavitation forces of a biological hammer: strike forces of the peacock mantis shrimp *Odontodactylus scyllarus*. *J. Exp. Biol.* 208 (19), 3655–3664.
- Patek, S.N., Korff, W.L. and Caldwell, R.L. (2004) Deadly strike mechanism of a mantis shrimp. *Nature* 428, 819-820.
- Svenska vatten och avloppsverksföreningen (1988) *Publikation VAV P58 Tryckslag i VA-anläggningar*.
- Wan, W., Mao, X. (2016) Shock wave speed and transient response of PE pipe with steel-mesh reinforcement. *Shock Vib.* 2016(5):1-10.
- Wood, D., Lingireddy, S., Boulos P.F., Karney, B.F., Mcpherson, D.L. (2005) Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems. *Journal - American Water Works Association* 97(7):104-115
- Wylie E.B., Streeter, V.L. (1978) *Fluid Transients*. McGraw-Hill Inc.
- Zhang, Z. (2020) *Hydraulic Transients and Computations*. Springer.