

Trykkslag i vannledningsnettet og potensiale for mikrobiell forurensning: Case studie fra Bergen

Av Sam Alaya, Sandra McCarley, Siv Henriksen og Tor-Arne Torsvik

Sam Alaya er (M.Sc) er utdannet i bygg og miljøteknikk fra NTNU og overingeniør for avdeling vannforsyning i Bergen Vann.

Sandra McCarley er (M.Sc) er utdannet i Water Resources and Environmental Engineering fra Massachusetts Institute of Technology (MIT) og senior VA-ingeniør for Vann Vest AS.

Siv Henriksen er (M.Sc) er utdannet i marin teknikk fra NTNU og overingeniør for avdeling vannforsyning i Bergen Vann.

Tor-Arne Torsvik er (B.Sc) er utdannet i bygg og anlegg fra HVL og overingeniør for avdeling vannforsyning i Bergen Vann.

Summary

Pressure surges in the water distribution network and the potential for microbial contamination: A case study from Bergen. This study assesses the potential contamination of drinking water due to the intrusion of pathogens caused by low or negative pressure resulting from pressure transients (water hammer) in the water distribution system. Five study areas with different hydraulic characteristics were monitored using high-frequency pressure loggers over a period of 1 - 5 months to detect and measure pressure transients. The study also includes a survey of microbial contamination in flooded valve chambers and in the groundwater surrounding water pipes. Various types of pressure surges were recorded in the study, but no negative pressure or pressure below 2 bar were measured in the public water supply network. The most serious water hammer event had a pressure variation of 8 bar. Because of the high operating pressures in this distribution system, none of the water hammer events resulted in pressures that were low enough to compromise the system's hygienic

barrier. All eight samples taken from flooded valve chambers showed signs of fecal contamination (*E. coli* and fecal enterococci), indicating a risk of pathogen intrusion under low or negative pressure conditions. The software and high-frequency pressure loggers used in the study enabled the triangulation of the source of water hammer events. In several cases, the pressure surges were caused by commercial enterprises with large water withdrawals and fast closing or opening inlet valves. The utility's own handling of hydrants and valves was also found to be a source of pressure surges. The study demonstrates that pressure transients in the water distribution system are common. Reducing the frequency and magnitude of these is an important measure to protect water quality and maintain the life expectancy of the pipeline network. Pressure surges can create low pressure in the public water supply network, increasing the risk of contaminated liquid intrusion. Better control of installations for large consumers can help reduce the occurrence of pressure surges.

Good operational routines and proper training of water utility personnel can reduce pressure surges caused by system operation and maintenance. This study also highlights the importance of backflow protection.

Sammendrag

Denne studien vurderer potensialet for forurensning av drikkevann som følge av inntrenging av patogener ved lavt eller negativt trykk forårsaket av trykkslag (trykktransienter) i vandndistribusjonssystemet. Fem studieområder med ulike hydrauliske egenskaper har blitt overvåket med høyfrekvente trykkloggere over en periode på 1 - 5 måneder for å detektere og måle trykkslag. Studien omfatter også en kartlegging av mikrobiell forurensning i stående vann i vannkummer og i grunn- og grøftevannet rundt vannledninger. Studien viser at trykkslag i vandndistribusjonssystemet er vanlig. I studien har det blitt registrert ulike former for trykkslag, men ingen undertrykk eller trykk under 2 bar ble registrert. Den største trykkvariasjonen som er målt er 8 bar, men på grunn av svært høyt trykk i vannledningsnettets ble det ikke observert lave trykk på det offentlige hovedledningsnettets som bryter den hygieniske barrieren i systemet. Programvaren og de høyfrekvente trykkloggere som ble benyttet i studien, muliggjorde lokalisering av kilden til trykkslagene ved triangulering. I flere tilfeller ble trykkslagene forårsaket av næringsdrivende med store vannuttak og hurtiglukkende innløpsventiler. Bedre kontroll med installasjoner til storforbrukere kan bidra til å redusere forekomsten av trykkslag. Bergen Vanns håndtering av hydranter og ventiler ble også funnet å være en kilde til trykkslag. Gode driftsrutiner og god opplæring av driftspersonell ved vannverk kan redusere trykkslag forårsaket av drift og vedlikehold av vandndistribusjonssystemet. Trykkslag kan skape lavt trykk i det offentlige vannledningsnettets, noe som øker faren for innsug av forurenset væske. Samtlige 8 prøver tatt fra stående vann i vannkummer viser tegn på fekal forurensning (*E. coli* og intestinale enterokokker), som indikerer en risiko for inntrenging av patogener ved lavt eller negativt

trykk. Reduksjon i hyppigheten og størrelsen på trykkslagene er derfor viktige tiltak for å beskytte vannkvaliteten og opprettholde forventet levetid av vannledningsnettets.

Introduksjon

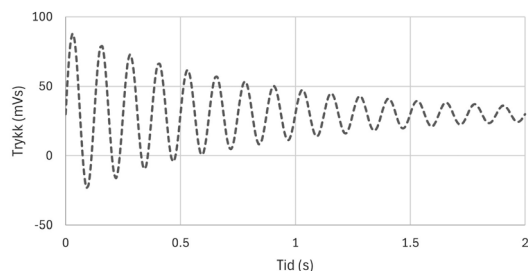
Primærbarrieren mot forurensning av drikkevann i vannledningsnettets er kontinuerlig trykksetting av systemet. De fleste vannverk har som mål å opprettholde et minimumstrykk på 2 bar (National Research Council, 2006) for å forhindre inntrenging av omkringliggende vann gjennom lekkende skjøter, sprekker, hull eller andre mindre feil på vannledningsnettets. Brann- og lufteventiler er også kritiske og sårbare punkter. Bergen Vann har flere rutiner for å sikre vannkvaliteten ved hendelser med kjent trykktap, som vannledningsbrudd og planlagte nedstengninger ved arbeid på vannledningsnettets. Det er imidlertid en risiko for uoppdagede lavt- og undertrykkhendelser på grunn av trykktransienter.

Denne studien tar i bruk ny teknologi for å kartlegge trykktransienter i drikkevannetsnettets i fem studieområder i Bergen. Studieområdene er valgt for å dekke ulike hydrauliske forhold. Hensikten er å vurdere potensiale for forurensning av drikkevannet som følge av inntrenging av patogener ved lavt eller negativt trykk.

Kort om trykktransienter og undertrykk

Trykktransienter oppstår som følge av raske endringer i vannhastigheten. Disse trykktransientene kalles «*water hammer*» på engelsk, på grunn av lyden som produseres når trykkbølgene slår mot rørvegger og ventiler. Maks amplitude til en trykktransient avhenger av rørmaterialet, men påvirkes i størst grad av vannhastigheten. En tommelfingerregel for å unngå trykkslag er å holde vannhastigheten i rørdninger under 3 m/s. For å redusere konsekvensene av trykkslag kan det benyttes elementer som rentvannsbassenger og trykktanker ved trykkøkingsstasjoner, som demper energien fra raske pumpestart og -stopp. Lukkede systemer uten dempende elementer som beskrevet over, er spesielt utsatt for trykkslag.

Trykktransienter kan beskrives som trykkbølger med høy- og lavtrykkskomponenter (Figur 1).

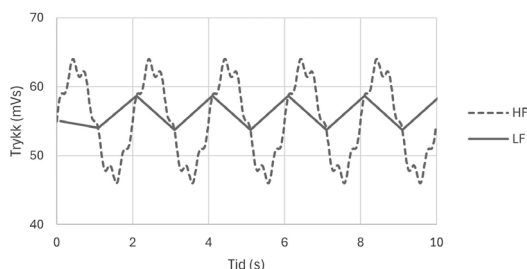


Figur 1. Trykktransient, illustrasjon.

Lavtrykssiden av trykkbølgen kan føre til undertrykk eller vakuum i ledningsnett. Bølgehastigheten bestemmes av rørets innvendige diameter, elastisitet og veggtykkelse. I duktile rør er bølgehastigheten i størrelsesorden 1000 m/s. Refleksjonstiden er tiden det tar for en trykkbølge å bevege seg fra kilden til systemets ende og tilbake, som for en enkelt rørledning er den tilbakelagte avstanden delt på bølgehastigheten. Refleksjonstiden vil være lengre i komplekse systemer med mange forgreninger og sløyfer. Trykktransienter er normalt altfor raske for å registreres med standard trykkloggere (Figur 2).

Sårbare elementer og vannfylte vannkummer

Brannventiler produsert før 1940 er utformet som en kjegle som tettes med en kule av tre, kork eller aluminium. Vanntrykket presser kule mot pakningen slik at ventilen holder tett. Ved vannavstenging eller andre hendelser med trykløst nett, faller kule ned i ventilhuset og slipper inn vannet som står over ventiltoppen. De første fjærbelastede brannventilene var på markedet rett før 1950 (Sjøvold et al. 2008).



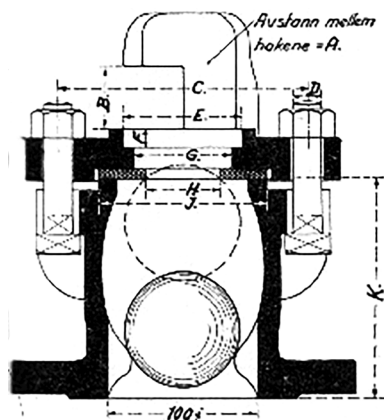
Figur 2. Høy (HF) vs. lavfrekvent (LF) trykkmåling, illustrasjon.

Fjæren under lukkemekanismen presser kule mot en gummipakning for å tette ventilen. Bergen kommune tok i bruk fjærbelastede brannventiler etter 1970-75. Figur 3, Figur 4 og Figur 5 viser eksempler av gamle og moderne brannventiler.

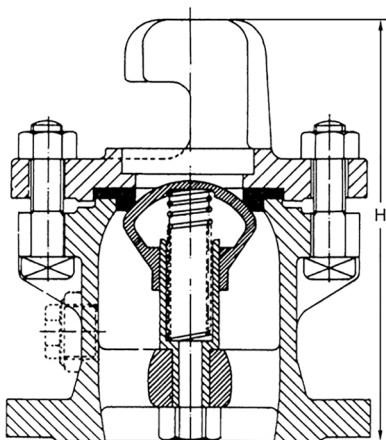
Dagens fjærbelastede brannventiler skal holde tett ved overtrykk på 0,2 bar (Oddevald, 2019). Imidlertid viste en test utført av Bergen Vann at vann lekket gjennom en trykløs ventil ved et overtrykk på 0,15 bar. For vannfylte kummer anbefaler leverandør bruk av brannventilsikring. I Bergen har brannventilsikring med forlenget håndtak vært montert i kummer hvor drenering er utfordrende. Håndtaket gjør det mulig for brannvesenet å fjerne sikringen fra bakkenivå når brannventilen må tas i bruk.

Kontroller utført av Bergen brannvesen viser at ca. 5% av vannkummene med montert brannventil er delvis fylt med vann. Det er ikke registrert felleskummer (kummer med avløpsvann og vannledning med armatur) på vannledningsnett i Bergen, men dette finnes i andre norske kommuner (Aass og Hansen, 2011).

Lufteventiler er også sårbare punkter i vannkummer. Enkeltvirkende lufteventiler skal slippe ut luft ved fylling av vannledning og dobbeltvirkende skal i tillegg slippe inn luft når det oppstår vakuum i vannledningen. Lufteventilene skal monteres på høydebrykk, men det er ofte blitt et standard element i vannkummer



Figur 3. Eldre versjon av brannventil med kule som tettes med vanntrykk (Oddevald, 2019).



Figur 4. Eksempel på nyere fjærbelastet brannventil, Esco S-0900 (Ulefos).



Figur 5. Eksempel på nyere fjærbelastet brannventil, Esco S-0940 (Ulefos).

(Figur 6). Ventilen skal ikke slippe vann inn når ledning har minimum trykk på 0,1 bar, men mest sannsynlig vil den slippe igjennom vann i vannfylte vannkummer med undertrykk (vakuum). Noen kommuner krever tilbakeslagssikring mellom luftventil og vannledningsnettet (Figur 7). De fleste luftventilene er laget i hard plast og vil være utsatt for sprekker, noe som øker risikoen for inntrenging av forurenset vann ved trykkløse episoder (Besner et al. 2010).

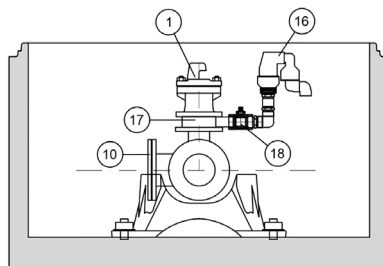
Grunn- og grøftevann rundt vannledninger

Grunn- og grøftevann kan være kilde til forurensning ved trykkløst nett eller undertrykk i ledningsnettet.

Omtrent 40% av ledningsbruddene i Bergen må repareres med trykkløst nett (data fra Gemini VA dagbok). Selv om arbeidsområdet

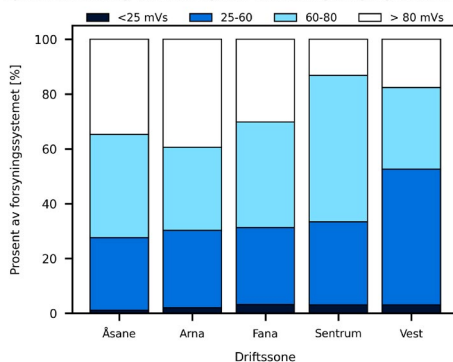


Figur 6. Eksempel på luftventil.



Figur 7. Eksempel på installering av luftventil (Drammen kommune VA-norm). 16 Luftventil, 18 Tilbakeslagsventil.

Gjennomsnittlig statisk trykk i vannforsyningssystemet i Bergen



Figur 8. Statisk trykk i vandistribusjonsnettet i Bergen.

eller den åpne delen av vannledningen beskyttes mot inntrenging av grøftevann, er det mulig for grunn- eller grøftevann å lekke inn gjennom små sprekker og hull.

Det er også mange andre planlagte trykkløse episoder hvor vandistribusjonsnettet er avstengt og trykkløst, som reparasjon av private ledninger, vedlikehold av det offentlige ledningsnettet og anleggsarbeid.

Bergen Vanns hydrauliske modell viser at de meste av vannledningsnettet har statisk trykk over 6 bar (Figur 8). Likevel har en betydelig del av nettet lavt statisk trykk og denne delen er særlig sårbar for undertrykk ved trykkslag. Når trykkslag oppstår i et ledningsnett med lavt trykk, øker risikoen for tilbakestrømning fra abonnenter uten tilstrekkelig tilbakeslagssikring.

Tidligere studier

Flere forskere har brukt høyfrekvente trykklogger for å kartlegge trykkslag i vandistribusjonssystemer.

Fleming et al. (2005) undersøkte fem distribusjonssystemer og fant at lavt eller undertrykk oftest oppstod i endeledninger. De påpekte at rentvannsbassenger bidro til å dempe trykkslag. Friedman et al. (2004) registrerte undertrykk i tre av syv overvåkede systemer. Gullick et al. (2005) fant ni trykkfall under 14 mVs i et 871 km langt nett, alle knyttet til akutte stans ved trykkøkingsstasjoner. Jin et al. (2022) oppdaget over 600 trykkslag i et 1313 km langt nett over en treårsperiode, mens Starczewka et al. (2015) påviste trykktransienter i fem komplekse nettverk, særlig i områder med industrielle abonnenter.

Flere studier har undersøkt hvordan lavt trykk kan føre til forurensning av vannforsyningen. Boulos et al. (2005) fant at de største trykkvariasjonene oppstod ved trykkøkingsstasjoner og reguleringsventiler, med størst risiko for forurensning i høyereliggende områder og i nettets periferi. Craun et al. (2001) viste at lavtrykksituasjoner hadde forårsaket kontaminering ved tilbakestrømning. Besner et al. (2011) målte flere lavtrykksepisoder med trykk under 2 bar i et 1600 km langt nett og fant mikrobiologisk forurensning i 60 % av de 45 undersøkte vannkummene. Ebacher et al. (2013) fant fekal forurensning i alle prøver fra 37 vannkummer, med overvann som sannsynlig kilde. Kirmeyer et al. (2001) beskrev risikoen for forurensning ved trykkslag og anbefalte tilbakestrømningssikring og gode driftsrutiner.

Metode

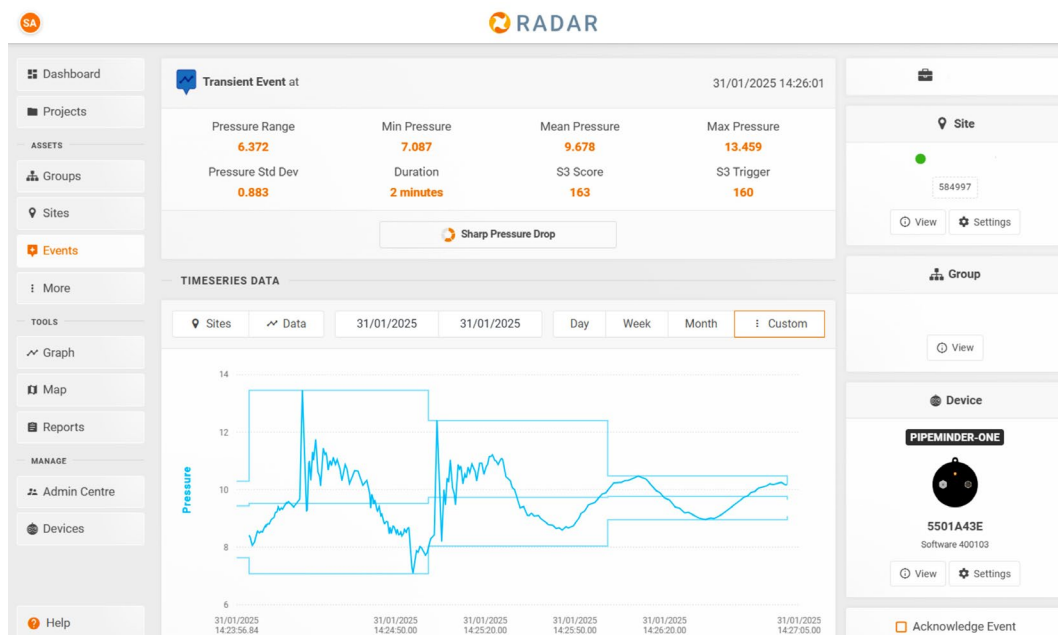
Kartlegging av trykktransienter ved bruk av høyfrekvente trykklogger

Trykkovervåkning med vanlig driftskontrollutstyr har ikke tilstrekkelig oppløsning til å registrere trykkslag. I studien ble det benyttet Pipeminder høyfrekvente trykkloggerne (Figur 9) som måler trykk med en frekvens opptil 128 Hz. Trykkloggerne har måleområde 0-20 bar, med målenøyaktighet $\pm 0.25\%$. De har automatisk tidssynkronisering (klokkeslett) via mobilnettet og leveres med egne SIM-kort for kommunikasjon. Trykkloggerne har IP68-klassifisering og kan installeres i vannfylte kummer.

Data fra trykkloggerne overføres til en skybasert database og er tilgjengelige via programvaren «RADAR» (Figur 10). RADAR har algoritmer som identifiserer og klassifiserer trykkslag etter systemdefinerte nivåer (S3-score: endring av trykk pr. tid, $\Delta p/\Delta t$). Programvaren har også algoritmer for identifisering av mønstre til trykkvariasjoner og kan klassifisere trykkslagene som eksempelvis oscillering, raskt trykkfall, rørbrudd og pumpestart. Dersom kunden leverer GIS-data om ledningsnettet (koordinater, diameter, rørmateriale m.m.) kan programvaren basert på de tidssynkroniserte måledataene fra trykkloggerne lokalisere kilden til trykkslaget ved triangulering.



Figur 9. Pipeminder, høyfrekvent trykklogger.



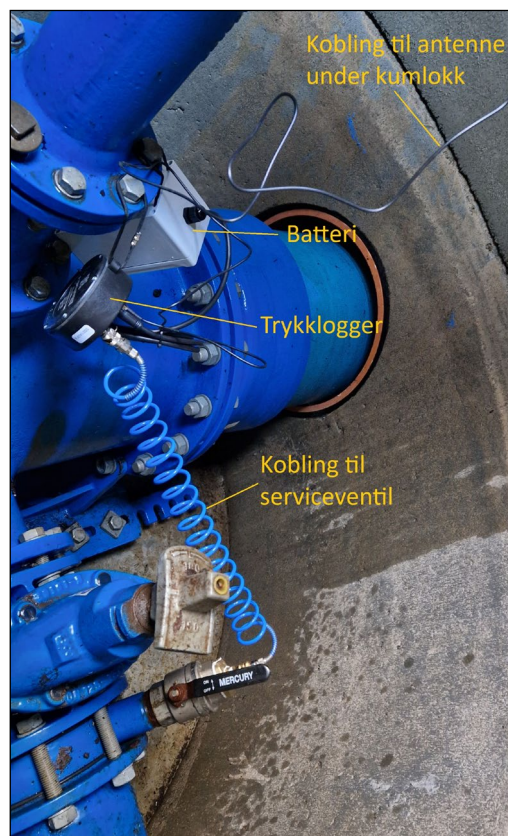
Figur 10. RADAR – programvare benyttet i studien.

Trykkloggerne ble montert hvor installasjonen var enkel, som i vannkummer med serviceventiler. Vannkummene ble rengjort før trykkloggerne ble installert. Figur 11 viser en typisk installasjon. Mobildekningen var god i alle studieområdene og dataoverføring fra enhetene fungerte med å feste antennene under kumlukkene.

Studieområder

Områdene som har blitt valgt i studien er deler av ledningsnettets hvor det er forventet å registrere trykkslag, som industriområder med abonnenter med høyt vannforbruk og områder der mikrobiell forurensning tidligere har vært påvist uten at kilden har blitt identifisert. Andre interesseområder for studien har vært lukkede deler av ledningsnettets som blir forsynt via reduksjonsventiler eller trykkøkingsstasjoner, uten dempende elementer som rentvannsbasseng tilkoblet. Måleperioden for hvert studieområde har vært minimum 3 måneder.

Tabell 1 gir en oversikt over størrelsene på studieområdene, antall sensorer, gjennomsnittlig statisk trykk, og daglig vannforbruk.



Figur 11. Typisk installasjon ved serviceventil.

Tabell 1. Studieområder, oversikt.

Studieområde	Grunnlag for valg	Vannforbruk [m ³ /dag]	Lengde kommunale ledninger [km]	Gjennomsnittlig statisk trykk [bar]	Antall trykkloggere [-]
Studieområde 1	Historisk vannkvalitetsproblem	2570	20	7,5	14
Studieområde 2	Industriområde: abonnenter med stort vannforbruk	2750	9,5	8,6	4
Studieområde 3	Lukket trykkområde: Vannfordistribusjonsnett forsynt fra trykkøkingsstasjon, uten tilkoblet utjevnende rentvannsbasseng	1490	3,59	4,8	3
Studieområde 4	Lukket trykkområde: Vannfordistribusjonsnett forsynt fra reduksjonsventil, uten tilkoblet utjevnende rentvannsbasseng	750	2,37	3,7	4
Studieområde 5	Industriområde med høyt trykk	180	2,17	8,3	4

kartlegging av potensial for forurensning

Studien hadde som mål å evaluere potensialet for forurensning i ulike deler av vandfordistribusjonssystemet under forskjellige hydrauliske forhold. For å kartlegge potensialet for forurensning ved trykkslag eller trykkløst nett, tok Bergen Vann vannprøver fra 8 vannfylte kummer lokalisert i studieområdene (Figur 12), samt prøver fra gravegropene til vannledningsbrudd (grøftevann), som oppstod i løpet av studieperioden (Figur 13).

Resultater

Høyfrekvent trykklogging

Følgende avsnitt presenterer resultatene for hvert av studieområdene. Tabell 2 viser største trykkslag, samt maks- og minimumstrykk målt i studien.

Studieområde 1:

Vannkvalitetshendelse i 2022

Studieområde 1 var et boligområde hvor det i en 5 ukers periode i 2022 ble gjort gjentagende sporadiske funn av fekal forurensning, uten at kilden til forurensning ble funnet. Vannledningsnettet består av grått støpejern fra 1950-60 tallene, nyere duktile og polyetylen ledninger. Det er to mindre kommunale og tre private trykkøkingsstasjoner i forsyningsområdet. Næringsdrivende abonnenter omfatter bla. en bensinstasjon med bilvask, et stort



Figur 12. Eksempel på vannfylt vannkum.



Figur 13. Eksempel på trykkløst nett og grøftevann.

Tabell 2. Studieområder, resultater fra høyfrekvent trykklogging.

Studieområde	Min. trykk [bar]	Maks trykk [bar]	Største trykkslag [bar]
Studieområde 1	4,5	9,5	2
Studieområde 2	5,0	9,3	2,5
Studieområde 3	4,6	6,7	1
Studieområde 4	3	6,5	2
Studieområde 5	6	16,3	8
Andre undersøkelser	4,4	7,3	2,5

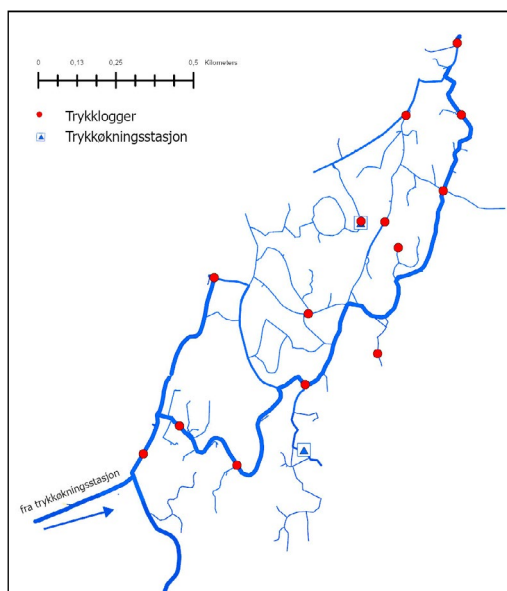
kjøpesenter og en svømmehall. Minimum statistisk trykk er 5,5 bar.

Plasseringene av trykkloggerne (14 stk.) er vist i Figur 14. Erfaringene fra Studieområde 1 var at det ikke var nødvendig med så tett plassering av loggerne. Det var mulig å hente ut tilstrekkelig informasjon om størrelse og type trykkslag med kun 3 trykkloggere i områder av tilsvarende størrelse.

Etter forurensningsepisoden i 2022 ble det installert et flowcytometer (FCM) ved den største trykkøkningsstasjon. Flowcytometeret gir hyppige målinger av antall bakterieceller og kan skille mellom levende og inaktive organismer.

Kontinuerlig trykkovervåking over en periode på 1,5 måneder avdekket ikke negative eller trykkløse hendelser. Det ble observert trykkvariasjoner på opptil 1 bar (Figur 15), som programvaren klassifiserte som «oscillering», der kilden sannsynligvis var kommersiell bilvask. Flowcytometeret viste en økning i antall biologiske celler ved trykkvariasjoner, men dette skyldes mest sannsynlig avviring av biofilm og ikke inntrenging av forurensning.

De hydrauliske forholdene i studieområde 1 under måleperioden var endret siden vannkvalitetshendelsen i 2022. I denne perioden var rentvannsbassenget, som leverte vann til området, ute av drift og området ble forsynt av en stor trykkøkningsstasjon med frekvensstyrte pumper, mot lukket nett. Rentvannsbassenger demper og utjevner trykkvariasjoner og det er sannsynlig at trykkslagene uten dempende elementer kan ha vært større i 2022, enn trykkslagene som ble



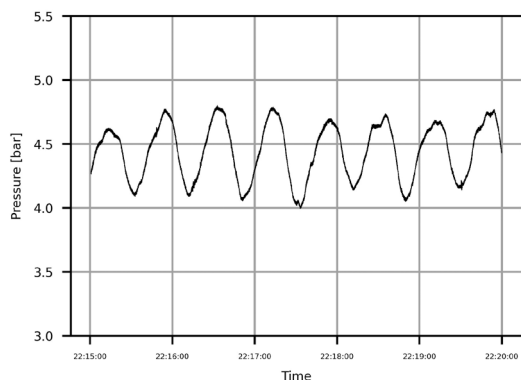
Figur 14. Studieområde 1 – Plassering av trykkloggere.

målt under studien. Det er likevel lite sannsynlig at kildene til trykkslag som ble avdekket i måleperioden, kan ha skapt så lavt trykk at det kunne medført til innsug av forurenset vann på vannledningsnettet under vannkvalitetshendelsen i 2022.

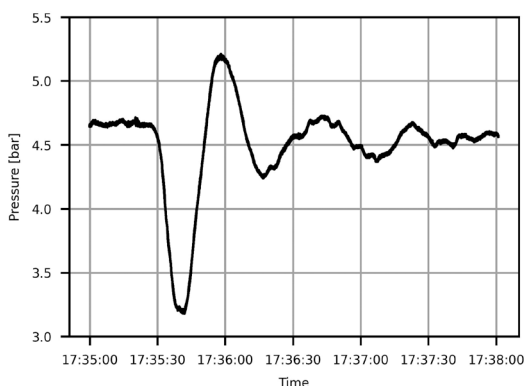
Det ble også registrert trykkslag fra egen ventilhåndtering i dette studieområdet. Feil ventilhåndtering av hydrant (for rask åpning og stenging av uttak) medførte til trykkslag med variasjon på 2 bar (Figur 16).

Studieområde 2: Industriområde

Studieområde 2 omfatter flere industribedrifter med et høyt og intensivt vannforbruk. Området



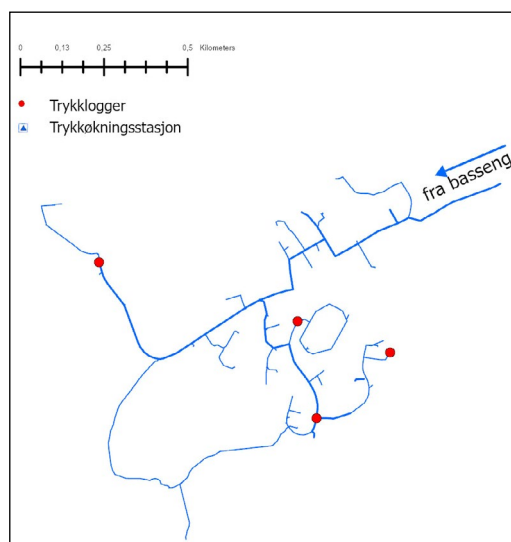
Figur 15. Eksempel på «oscillering» trykkehendelse.



Figur 16. Trykkslag grunnet hurtig åpning og stengning av hydrant ved prøvetaking.

har omtrent 10 km kommunale ledninger og forsynes både fra en stor trykkøkingsstasjon plassert 7,5 km unna og et 35.000 m³ stort rentvannsbasseng lokalisert 5 km fra området. Rentvannsbassenget virker utjevnende på trykkvariasjoner i vannledningsnettet. Samtlige hovedledningene er av duktilt støpejern. Statisk trykk i området er høyt, med minimumsverdi på 6,5 bar. Fire trykkloggere var installert som vist i Figur 17. Målingene ble utført over en periode på 5 måneder.

Målingene registrerte hyppige trykkslag med 2,5 bar trykkvariasjon (Figur 18). Programvaren klassifiserte trykkslagene som «sharp pressure drop», noe som kan skyldes hurtig ventilåpning og/eller -lukking med stort vannuttak over kort tid. Kilden til trykkslagene var en næringsmiddelprodusent med stort vannforbruk, som ble lokalisert ved triangulering.

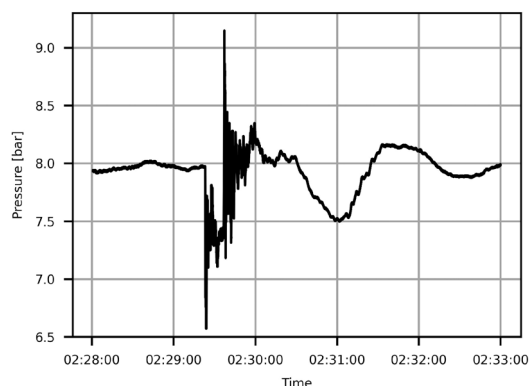


Figur 17. Studieområde 2 – plassering av trykkloggere.

Studieområde 3: Lukket område forsynt via trykkøkingsstasjon

Studieområde 3 er et lukket område som forsynes direkte fra en trykkøkingsstasjon, uten et tilknyttet rentvannsbasseng som ville dempet trykkslagene. Området består av boliger og har ca. 3,6 km kommunale ledninger. I måleperioden leverte trykkøkingsstasjonen i gjennomsnitt 30 m³/t, med en maksimal leveranse på 70 m³/t. Det ble installert 3 trykkloggere i studieområdet (Figur 19).

Det ble ikke oppdaget store trykkvariasjoner i studieperioden, men trykkloggeren som var

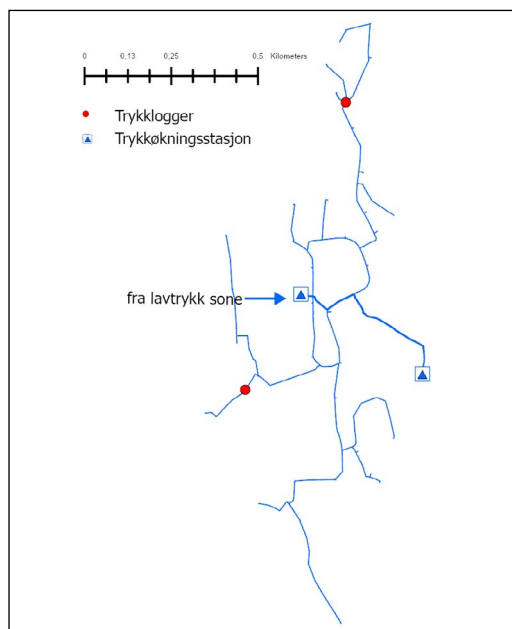


Figur 18. Trykkslag forårsaket av abonnent.

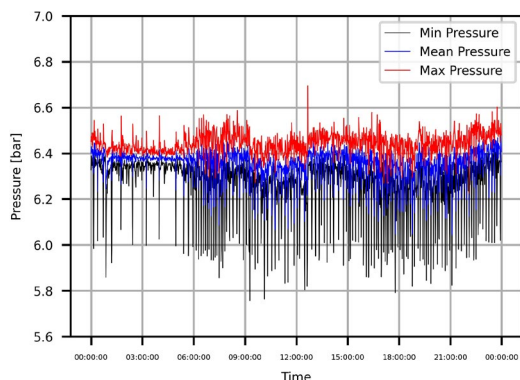
installert nærmest trykkøkingsstasjonen viste kontinuerlige trykkvariasjoner mindre enn 1 bar (Figur 20). Slike trykkvariasjoner påfører vannledningene spenningsvariasjoner som kan redusere levetiden og føre til tretthetsbrudd, spesielt på stikkledninger.

Studieområde 4: Lukket område forsynt via trykkreduksjonsventil

Studieområde 4 omfatter flere næringsdrivende, inkludert et vaskeri med et relativt stort vann-



Figur 19. Studieområde 3 - plassering av trykkloggere.



Figur 20. Oscillerende trykk i nærheten av trykkøkingsstasjon.

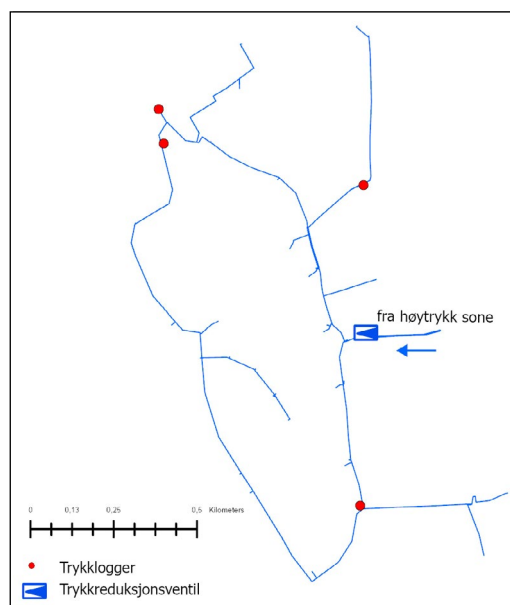
forbruk. Området er valgt for å studere potensialet for trykkslag i et lukket område forsynt via en reduksjonsventil. Reduksjonsventilen er 150 mm og reduserer trykk til 4,5 bar. Det ble installert 4 trykkloggere i studieområdet (Figur 21).

Målingene viser et tydelig mønster i vannforbruket til de næringsdrivende abonnentene. Trykkvariasjonene var størst i ukedagene og veldig begrenset i helgene (Figur 22). Generelt var trykkslagene i dette området moderate og ingen episoder hadde trykkvariasjoner over 1,5 bar (Figur 23).

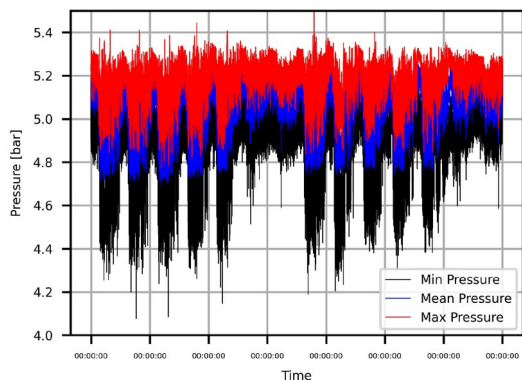
Studieområde 5: Industriområde med høyt trykk

Studieområde 5 er et industriområde med statisk trykk over 8 bar. Det ble installert 4 trykkloggere i dette området (Figur 24). Trykkslagene som ble registrert i studieperioden var store og hyppige, spesielt på hverdager mellom kl. 7 og kl. 19 (Figur 25).

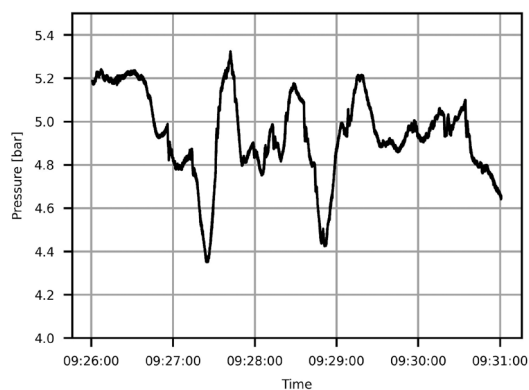
Ved hjelp av triangulering ble kilden til trykkslagene lokalisert til et vaskeri som tapper vann direkte fra vannledningsnettet uten regulering. Vannuttakene fra vaskeriet er store og



Figur 21. Studieområde 4 - plassering av trykkloggere.



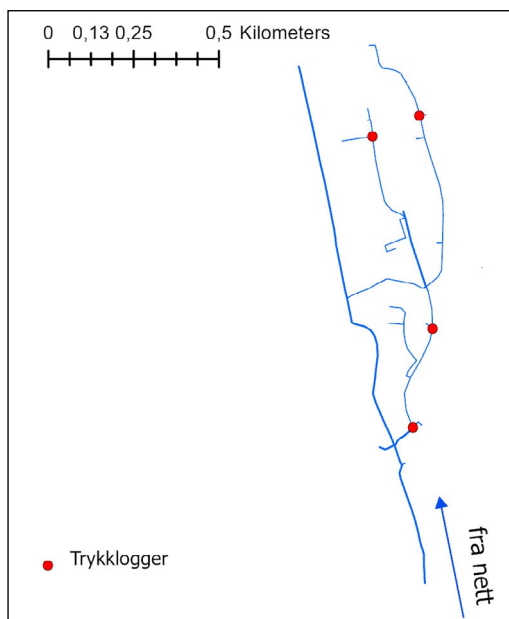
Figur 22. Trykkmålinger over en periode på to uker. Størst trykkvariasjoner i ukedagene og lavest trykkvariasjoner i helgene.



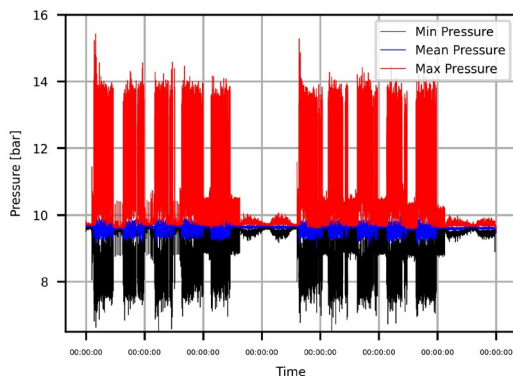
Figur 23. Oscillerende trykk i nærheten av trykkreduksjonsventilen.

over korte tidsintervall (ofte mindre enn et minutt) og genererer trykkslag i vannledningsnettet. Det daglige vannforbruket til vaskeriet er lavt, gjennomsnittlig ca. 20 m³/t, men uttakene på 50 m³/t i løpet av et kort tidsintervall, medfører at trykket i vannledningsnettet svinger kraftig med en amplitude på omtrent 4 bar. Dette gir et trykkslag på rundt 8 bar (Figur 26), som er svært skadelig for vannledningsnettet.

Bergen Vann tok kontakt med abonnenten og gjennomførte en fysisk befaring for å kartlegge utstyret ved abonnentens inntak. Sammen ble det konkludert med at installasjon av en tank ville bidra til å jevne ut vannforbruket og motvirke trykkslag. Abonnenten installerte derfor en avlastningstank, noe som førte til en betydelig reduksjon av trykkslagene (Figur 27).



Figur 24. Studieområde 5 – plassering av trykkloggere.

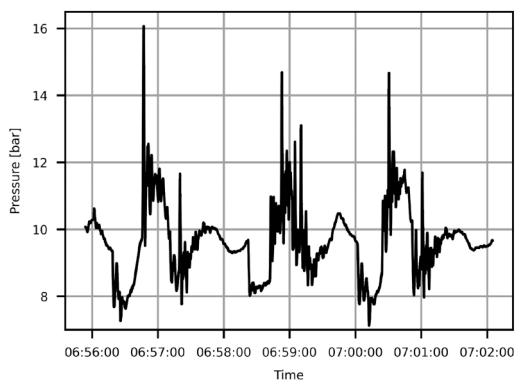


Figur 25. Trykkslag forårsaket av abonnenten i løpet av en to ukers periode, med tydelig forskjell mellom hverdager og helg.

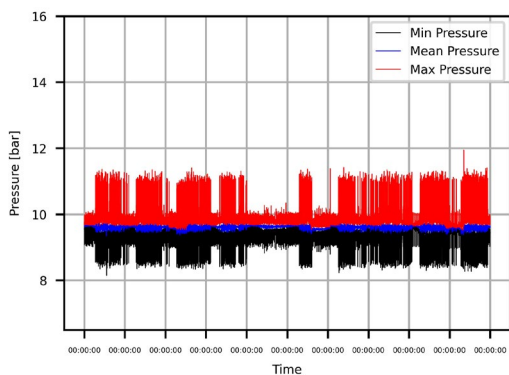
Trykkslagene ble redusert fra om lag 8 bar til rundt 2 bar (Figur 28). Det ble i tillegg avtalt å justere åpne- og lukkehastigheten på magnetventilen som benyttes under tankfylling, slik at trykkslagene ytterligere kan reduseres til en neglisjerbar størrelse på omtrent 0,5 bar.

Andre undersøkelser

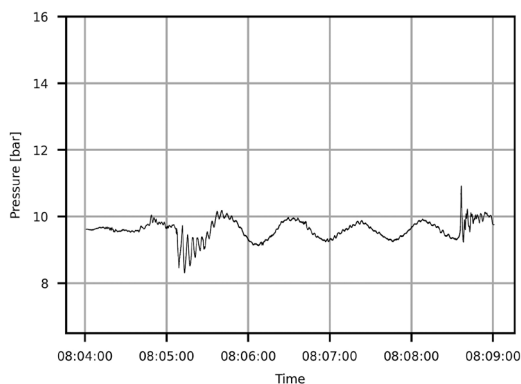
Bergen vann har også installert trykkloggere i flere mindre områder med kortere varighet for å avdekke trykkslag forårsaket av storforbrukere.



Figur 26. Eksempel på et trykkslag.



Figur 27. Trykkslag etter installasjon av tank.



Figur 28. Eksempel på trykkslag etter installasjon av tank.

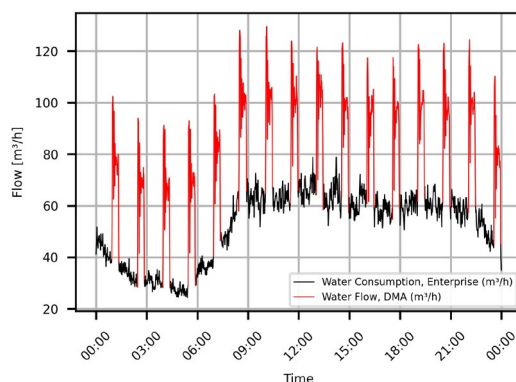
Et eksempel er en abonnent som har regelmessige tappinger av vann i størrelsesorden $50 \text{ m}^3/\text{t}$ i perioder på 20 minutter (Figur 29). Ifølge abonnenten har de montert sakte-åpnende ventiler for å hindre trykkslag, men trykkmålingene med høyfrekvente trykkloggere viste at vannuttaket skaper trykkslag i vann-

ledningsnettet med trykkvariasjoner på ca. 2,5 bar (Figur 30).

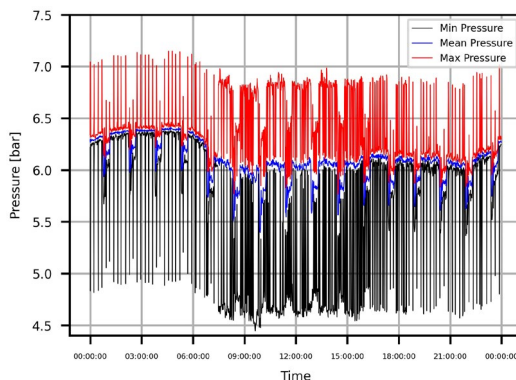
Etter kontakt med abonnenten, ble eksisterende trykktank til hydrofor vedlikeholdt og åpne- og lukkehastigheten til magnetventilen for tankfylling ble endret. Dette har eliminert trykkslagene som ble generert av hydroforen, samt redusert trykkslagene fra ventilen ned til ca. 0,5 bar (Figur 31).

Vannprøver fra vannfylte vannkummer og grøftevann

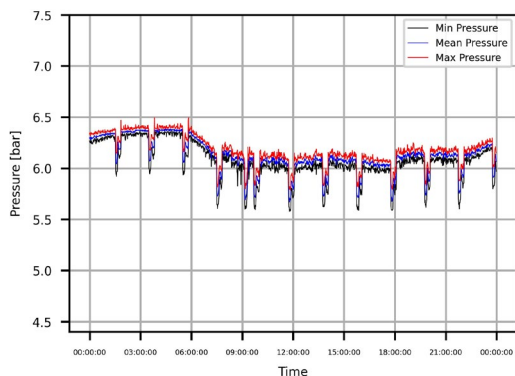
Det ble tatt 8 vannprøver fra vannkummer med stående vann og det ble påvist *E. coli* (indikator på fersk fekal forurensning) og intestinale enterokokker (indikator på fekal forurensning) i samtlige prøver (Figur 32).



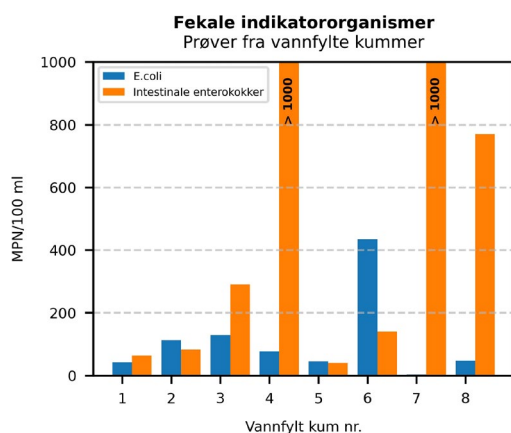
Figur 29. Vannforbruk i målsonen med stort og regelmessige uttak fra en abonnent (fylling av tank).



Figur 30. Trykkslag grunnet store og regelmessige uttak (fylling av tank), samt hydrofor.



Figur 31. Trykkslag etter gjennomført tiltak.



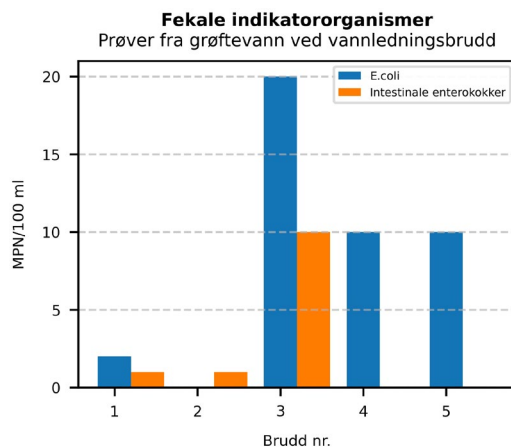
Figur 32. Resultater fra prøvetaking fra vannfylte vannkummer.

Det ble tatt 5 vannprøver av grøftevann ved ledningsbrudd. Samtlige prøver inneholdt fekal forurensning (Figur 33), men med lavere verdi enn prøvene fra de vannfylte kummene.

Selv om antallet vannprøver i denne studien er begrenset, ble det påvist indikatororganismer i samtlige prøver. Dette indikerer at det foreligger en betydelig risiko for mikrobiologisk forurensning av drikkevann dersom vann fra vannfylte kummer, grøftevann eller grunnvann trenger inn i ledningsnett under trykkkløse episoder.

Oppsummering og konklusjon

Studien har kartlagt og utredet trykktransienter i fem studieområder. Resultatene fra studien viser at det er en risiko for undertrykk i vann-



Figur 33. Resultat fra prøvetaking av grøftevann fra 5 bruddreparasjoner.

ledningsnett grunnet trykktransienter. Det ble målt trykktransienter som gav svingninger i trykk opptil +/- 4 bar fra normalt gjennomsnittstrykk. De fleste trykkslagsepisodene skyldes næringsdrivende abonnenter med stort vannforbruk, ofte i kombinasjon med automatiske innløpsventiler som har korte åpne-/lukketider. Studien viser videre at ventilhåndtering hos Bergen Vann også er kilde til trykkslag. I studieområdene med lukket nett, forsynt fra en trykkøkingsstasjon eller en reduksjonsventil, ble det ikke målt store trykktransienter.

Det ble ikke registrert trykk under 2 bar i det offentlige vandndistribusjonsnett, som anses å være minimumstrykket for å sikre hygienisk barriere. Dette utelukker imidlertid ikke muligheten for at trykktransienter kan ha forårsaket undertrykk på privat nett i høytliggende områder. Dersom noen av trykktransientene som ble registrert under studien hadde oppstått i områder med normalt forsyningstrykk (under 6 bar), ville de medført alvorlig lavt trykk i nettet.

Vannfylte kummer er sårbare komponenter i vandndistribusjonssystemet. Prøveresultatene fra de vannfylte kummene viste høyt innhold av indikatororganismerne *E. coli* og intestinale enterokokker. Dette bør motivere vannverkene til å ha god drenering av vannkummer hvor brann- og lufteventiler er installert. Til sammenligning viste prøvene av grøftevann (antas å

være grunnvann) lavere verdier av indikator-organismer. Dette antyder at risikoen for forurensning gjennom mindre lekkasjepunkter på ledningsnettet er lavere enn risikoen for innsug av forurensning fra vannfylte kummer.

Risiko for forurensning av drikkevann ved trykkslag er tilstede. Risikoabonnenter og vannverkenes driftsaktivitet kan forårsake trykktransienter og denne risikoen bør forebygges med bedre kontroll av risikoabonnentene og vannverkenes egne driftsrutiner.

Et av formålene med studien har vært å ta i bruk ny teknologi for forbedret overvåking og analyse av trykktransienter. Det ble gjort gode erfaringer med høyfrekvente trykkloggere fra Syrinix (nå Badger Meters), hvor data ble overført til skyløsningen RADAR for sanntidsanalyse og lokalisering ved hjelp av triangulering. På grunnlag av disse erfaringene har Bergen Vann intensjon om å installere trykkloggere permanent i distribusjonsnettet. Disse vil konfigureres med høy terskelverdi (S3) for å registrere større trykkendringer. I tillegg planlegger Bergen Vann å kartlegge og analysere områder med potensiell risiko for trykktransienter ved å plassere ut trykkloggere i tidsbegrensede måleperioder.

Takksigelse

Denne studien er støttet økonomisk av Folkehelseinstitutt under program for teknologitvilling i vannbransjen.

Eskeland Electronics AS har støttet prosjektet økonomisk med redusert salgspris på utstyret samt ett års kostnadsfri tilgang til skyplattform og analyseprogram.

Referanser

Aass, E. og Hansen, G. H. (2011). Felleskummer for vann og kloakk – mulig å oppnå redusert risiko for forurensning av vannledningsnettet uten full separering? *Vann*, 47(3). <https://vannforeningen.no/dokumentarkiv/felleskummer-for-vann-og-kloakk-mulig-a-oppna-reducert-risiko-for-forurensning-av-vannledningsnettet-uten-full-separering/>

Besner, M. C., Ebacher, G., Jung, B. S., Karney, B., Lavoie, J., Payment, P., & Prévost, M. (2010). Negative pressures in full-scale distribution system: Field investigation, modelling, estimation of intrusion volumes and

risk for public health. *Drinking Water Engineering and Science*, 3(2), 101–106. <https://doi.org/10.5194/dwes-3-101-2010>

Besner, M. C., Prévost, M., & Regli, S. (2011). Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: Conceptual model, available data, and challenges. *Water Research*, 45(3), 961–979. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.035>

Boulos, P. F., Karney, B. W., Wood, D. J., & Lingireddy, S. (2005). Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. *Journal AWWA*, 97(5), 111–124. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2005.tb10892.x>

Craun, G., & Calderon, R. L. (2001). Waterborne disease outbreaks caused by distribution system deficiencies. *Journal AWWA*, 93(9), 64–75. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1551-8833.2001.tb09287.x>

Ebacher, G., Besner, M. C., & Prévost, M. (2013). Submerged appurtenances and pipelines: An assessment of water levels and contaminant occurrence. *Journal AWWA*, 105(4), 43–44. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2013.105.0156>

Fleming, K. K., Gullick, R. W., Dugandzic, J. P., & LeChevallier, M. W. (2005). Susceptibility of potable water distribution systems to negative pressure transients. *New Jersey Department of Environmental Protection*. December 16, 2005. <http://hdl.handle.net/10929/33036>

Friedman, M., Radder, L., Harrison, S., Howie, D., Britton, M., Boyd, G., Wang, H., Gullick, R., LeChevallier, M., Wood, D., & Funk, F. (2004). Verification and control of pressure transients and intrusion in distribution systems. *AWWA Research Foundation & U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)*.

Gullick, R. W., LeChevallier, M. W., Case, J., Wood, D. J., Funk, J. E., & Friedman, M. J. (2005). Application of pressure monitoring and modelling to detect and minimize low pressure events in distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 54(2), 65–81. <https://doi.org/10.2166/aqua.2005.0007>

Jin, S., Saparia, B., Norton, J., Wood, B., Abdallah, A., McClinton, T., Burchi, J., & Radtke, L. (2022). Monitoring of pressure transients in Great Lakes Water Authority water transmission system. *Journal of Water Management Modeling*, 30. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C492>

Kirmeyer, G. J., Friedman, M., Martel, K., Howie, D., LeChevallier, M., Abbaszadegan, M., Karim, M., Funk, J., & Harbour, J. (2001). Pathogen intrusion into the distribution system. *AWWA Research Foundation & U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)*.

National Research Council. *Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks*. National Academies Press, 2006. <https://doi.org/10.17226/11728>

Oddevald, J. E. (2019). Brannventiler: Krav til materialer og utførelse. *VA-miljøblad* 47. Norsk Rørsenter.

Sjøvold, F., Hansen, A., & Rønning, C. (2008). Helsemessig sikkert vannledningsnett. *Norsk Vann Rapport* 161-2008. Norsk Vann.

Starczewska, D., Collins, R., & Boxall, J. (2015). Occurrence of transients in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 119, 1473–1482. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.001>



Bli med i fagnettverket Tekna Klima

Er du Tekna-medlem og engasjert i klima og fornybar energi er Tekna Klima nettverket for deg. Bli med på faglige arrangementer og møt likesinnede fra ulike sektorer som jobber med klimaspørsmål både nasjonalt og internasjonalt.

Bli med i nettverket på
tekna.no/teknaklima
eller send **Teknaklima**
til 2007

