



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2021 30 stp**

Fakultet for realfag og teknologi

## **Studie av aktiv trykkstyring som metode for lekkasjereduksjon i vandistribusjonsnettet**

Study of active pressure control as a method for leakage reduction in the water distribution system

**Lars Henrik Pettersen**

Industriell økonomi

---

---

## Forord

Denne oppgaven markerer avslutningen på mastergraden innenfor Industriell Økonomi ved NMBU. Tiden som student har vært en fantastisk opplevelse, og disse årene ville jeg ikke vært foruten! Oppgaven omfattet 30 studiepoeng, og ble skrevet våren 2021.

Jeg vil benytte anledningen til å takke min veileder Vegard Nilsen for uvurderlig hjelp til denne oppgaven. Din tålmodighet og hjelpsomhet gjorde prosessen rundt denne oppgaven mye enklere. Du har kommet med mange gode forslag og innspill, samt bidratt med nyttig litteratur og tips til utforming.

Oppgaven tar for seg et svært interessant tema som forsøker å tilnærme seg en løsning på en av samfunnets mest alvorlige infrastrukturelle problemer, nemlig store lekkasjeandeler i drikkevannsnettet. Det er utrolig spennende å få ta del i arbeidet for å komme frem til en løsning på dette problemet, og jeg håper at denne oppgaven kan bidra til å kaste lys over problemstillingen knyttet til vannlekkasje, samt metoden oppgaven foreslår som en tilnærmelse til en løsning.

Jeg vil få benytte anledningen til å takke venner og familie for moralsk støtte i en meget slitsom periode. Dette hadde vært en utrolig krevende oppgave å gjennomføre uten deres støtte. Det føles vemodig og trist å forlate Ås og NMBU. Mange vennskap har blitt stiftet, mange gode minner har blitt skapt!

---

## Sammendrag

Lekkasje i drikkevannsnettet er et stort problem i internasjonal sammenheng. I Norge utgjør lekkasjeandelen omtrent 31 % av alt behandlet vann transportert gjennom vanddistribusjonsnettet. Lekkasje av behandlet vann innebærer et stort økonomisk tap for samfunnet. Store summer penger investeres i distribusjon og behandling av vann, hvilket representerer et betydelig økonomisk tap ved store lekkasjeandeler.

I senere tid har fokuset i VA-bransjen skiftet i retning av lekkasjereduksjon. Det er godt kjent i miljøet at lekkasjeandel og trykknivå i systemet henger tett sammen. Trykknivået i ledninger må være balansert: for høye verdier fører til økt lekkasjefrekvens, samt økt risiko brudd og skader på infrastruktur. For lave nivåer kan medføre at vannforsyningen stanser opp i enkelte områder. Samtidig er det en økt risiko forurensning av drikkevannet ved lavt trykk. En metode som er testet ved flere forskjellige forsøk er aktiv trykkstyring. Metoden baserer seg på optimalisering av trykknivået i ledningsnettet til enhver tid, basert på metoder for dynamisk trykkstyring, hovedsakelig ved bruk av trykkreduksjonsventiler og pumper.

Dette studiet er bygget opp som et litteraturstudium. En del av oppgaven skal kartlegge ledningsnettets tilstand i norske kommuner som er sentrale i VA-sammenheng. Informasjonen innhentes ved mailutveksling med disse kommunene. En annen del av studiet innebærer et litteraturstudium av eksisterende fagstoff om temaet. Disse studiene blir gjengitt i dette studiet, som skal samle og oppsummere viktige erfaringer som er gjort med aktiv trykkstyring. Ettersom implementering av aktiv trykkstyring kan være kostbart, vil det også bli betraktet et kost-nytteperspektiv ved studiet. Gir aktiv trykkstyring en økonomisk gevinst gjennom kostnadsbesparelser sammenlignet å la være og utbedre skader, og optimalisere trykknivåer?

Det kan konkluderes med, både fra spørreundersøkelse og litteraturstudium, at aktiv trykkstyring er en effektiv metode for lekkasjereduksjon, samt kostnadsbesparelser. Studiet fant at aktiv trykkstyring kan bidra til å optimalisere trykknivået i ledninger for å være i stand til å møte forbruket. I kombinasjon med vedlikeholdsarbeid og konvensjonell trykkstyring, kan aktiv trykkstyring gi både lekkasje- og kostnadsmessige besparelser under de rette forutsetninger. Det må analyseres i hver enkelt situasjon hvilket tiltak for aktiv trykkstyring som passer best, eller om det i det hele tatt omfatter god kost-nytte-verdi.

---

## Summary

Leakage in the drinking water network is a major problem in an international context. In Norway, the leakage rate is approximately 31% of all treated water transported through the water distribution network. Leakage of treated water means a great financial loss to society. Large costs are related to investments in the distribution and treatment of water, which is lost due to large leakage rates.

In recent times, the focus in the water engineering-industry has shifted in the direction of leakage reduction. It is well known in the environment that the proportion of leaks and the pressure level in the system are closely linked together. The pressure level in pipes and networks must be balanced: too high values may lead to increased leakage frequency, as well as an increased risk of breakage and damage to infrastructure. Too low levels can cause the water supply to stop in some areas. At the same time, there is an increased risk of contamination of drinking water at low pressure. One relevant method that has been tested in several different experiments is active pressure control. The method is based on always optimizing the pressure level in the pipeline network, based on methods of dynamic pressure control, mainly using pressure reducing valves and pumps.

This study is structured as a literature study in combination with a survey. A significant part of the task is to map the condition of the pipe network in norwegian municipalities that are central in a water engineering context. The information is obtained by email exchange with these municipalities. Another part of the study involves a literature study of existing literature on the topic. These studies are reproduced in this study, which will gather and summarize important experiences made with active pressure control. As the implementation of active pressure control can be costly, a cost-benefit perspective will also be considered in the study. Does active pressure control provide an economic benefit through cost savings compared to not repairing damage, and optimizing pressure levels?

It can be concluded, both from the survey and the literature study, that active pressure control is an effective method for reducing leakage, as well as cost savings. The study found that active pressure control can help optimize the pressure level in pipes to be able to meet consumption levels. In combination with maintenance work and conventional pressure control, active pressure control can provide both leakage and cost savings under the right conditions. It must be analyzed in each individual situation which measure for active pressure control is most suitable, or whether it at all includes good cost-benefit value.



---

# Innholdsfortegnelse

<b>FORORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>III</b>
<b>INNHOLDSFORTEGNELSE</b> .....	<b>V</b>
<b>FIGURLISTE</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABELLISTE</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 PROBLEMSTILLING OG FORSKNINGSSPØRSMÅL .....	1
1.2 OPPGAVENS STRUKTUR OG UTFORMING .....	2
<b>2 BAKGRUNN</b> .....	<b>3</b>
2.1 DRIKKEVANNSNETTET .....	3
2.2 LEKKASJE I DRIKKEVANNSNETTET .....	3
2.2.1 Lekkasjeandel i Norge .....	3
2.2.2 Årsaker til lekkasje .....	4
2.2.3 IWAs vannbalanse .....	4
2.2.4 Beregning av vanntap ved CARL, UARL og ILI .....	5
2.2.5 Fokus på lekkasjereduksjon .....	6
2.3 FORBRUKSMØNSTER OG DØGNVARIASJONER .....	7
2.3.1 Totalt vannforbruk.....	7
2.3.2 Variasjoner i produksjon og vannforbruk.....	8
2.4 GENERELL HYDROMEKANIKK OG HYDRAULIKK .....	10
2.4.1 Kontinuitet.....	10
2.4.2 Bernoullis prinsipp.....	11
2.4.3 Friksjonstap.....	13
2.4.4 Trykk.....	15
2.4.5 Lekkasjevannføring som funksjon av trykk.....	15
2.5 PUMPER .....	18
2.5.1 Prinsippet bak pumpen.....	19
2.5.2 Affinitetslovene .....	20
2.6 TRYKKREDUKSJONSVENTILER .....	21
2.7 AKTIV TRYKKSTYRING.....	22
2.7.1 Pumpestyring.....	22
2.7.2 Metoder og utstyr for trykkstyring .....	23
2.7.3 Soneinndeling.....	24
2.7.4 IT-teknologi.....	26
<b>3 METODE</b> .....	<b>27</b>
3.1 BAKGRUNNSKAPITTEL .....	27
3.2 SPØRREUNDERSØKELSER OG KARTLEGGING AV TILSTAND I KOMMUNER .....	27
3.3 LITTERATURSTUDIE .....	29
<b>4 AKTIV TRYKKSTYRING I NORGE</b> .....	<b>30</b>
4.1 OSLO KOMMUNE .....	30
4.2 TRONDHEIM KOMMUNE.....	31
4.3 DRAMMEN KOMMUNE.....	33
4.4 BERGEN KOMMUNE.....	34

<b>5</b>	<b>LITTERATURSTUDIE</b> .....	<b>36</b>
5.1	CASE: AKTIV TRYKKSTYRING FOR LEKKASJEREDUKSJON I SØR-ITALIA.....	36
5.1.1	Casebeskrivelse .....	36
5.1.2	Metoder ved casestudiet .....	36
5.1.3	Resultater .....	38
5.2	CASE: AKTIV TRYKKSTYRING, POZNAŃ, POLEN.....	41
5.2.1	Casebeskrivelse .....	41
5.2.2	Metoder ved casestudiet .....	41
5.2.3	Resultater .....	44
5.3	CASE: ØKONOMISK ANALYSE AV TRYKKSTYRING FOR REDUKSJON AV LEKKASJE- OG SKADEFREKVENS .....	48
5.3.1	Kost-nytte-perspektiv.....	48
5.3.2	Casebeskrivelse .....	48
5.3.3	Bakgrunn .....	48
5.3.4	Metoder ved casestudiet .....	52
5.3.5	Resultater .....	55
<b>6</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>65</b>
6.1	SPØRREUNDERSØKELSER .....	65
6.1.1	Tilstand i forbindelse med lekkasjeandel og kostnader i kommunene .....	65
6.1.2	Aktiv trykkstyring i kommunene .....	66
6.2	LITTERATURSTUDIE .....	67
<b>7</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>74</b>
7.1	FORSKNINGSSPØRSMÅL .....	74
7.1.1	Hvordan er tilstanden i kommunene i forbindelse med lekkasjeandeler og kostnader for lokalisering, diagnostisering og utbedring av dette? .....	74
7.1.2	Er det satt i gang tiltak for aktiv trykkstyring, og hvilke tiltak er i så fall iverksatt? .....	74
7.1.3	Hvilke tiltak for aktiv trykkstyring er gjennomført i studiene? .....	74
7.1.4	Bidro disse tiltakene til reduksjon av lekkasjeandel? .....	75
7.1.5	Er tiltakene effektive i en kost-nytte-sammenheng? .....	75
	<b>REFERANSER</b> .....	<b>76</b>



---

## Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av tiltak for å redusere lekkasjeandel. (Columbia Basin Trust, 2013) .....	6
Figur 2: Et eksempel på forbruksvariasjon gjennom et døgn. Grafen beskriver et typisk tilfelle av døgnvariasjoner, med toppunkter ved morgen og ettermiddag. (Ødegaard, 2014).....	9
Figur 3: Prinsippskisse av kontinuitetsprinsippet. Figuren viser at vannets hastighet er omvendt proporsjonal med tverrsnitts-arealet. (Norsk Vann, 2019).....	11
Figur 4: Illustrasjonen tar hensyn til energilinjens (EGL) helning som følge av friksjonstap (hf). (Norsk Vann, 2019).....	12
Figur 5: oversikt over laminær ( $Re < 2000$ ) og turbulent ( $Re > 4000$ ) strømning. (Helseth, 2020). 13	
Figur 6: Moody-diagram for bestemmelse av friksjonsfaktor. Hentet fra (Engineers Edge, u.å.) 14	
Figur 7: Grafisk fremstilling av forholdet mellom lekkasjetall, og lekkasjeeksponent Hentet fra (van Zyl & Cassa, 2014) .....	18
Figur 8: Illustrasjon av innsiden til en Bermad-trykkreduksjonsventil. (Bermad, 2020) .....	21
Figur 9: Illustrasjon av soneinndeling i stavanger kommune, med inndeling av soner innad i bysoner 1-5. (Stavanger kommune, 2014) .....	25
Figur 10: Eksempel på modell utformet i EPANET. (EPANET.no, 2020) .....	26
Figur 11: Illustrasjon av to trykksoner DMA1 og DMA2 henholdsvis i rødt og blått, samt hovedledning fra nord til sør i oransje. illustrasjonen viser reservoaret som lyseblått punkt, samt 2 kontrollventiler i grønne punkter. trykksensorer markeres ved mørkeblå punkter. to kritiske noder markeres i punkt 13 og 14. (Bosco et al., 2020) .....	37
Figur 12: Resultater fra kalibrering. Figuren viser optimale timefaktorer for begge soner. ....	39
Figur 13: Lekkasjeandeler ved ulike scenarier .....	40
Figur 14: Trykknivåer ved kritiske noder i DMA1 (a), og DMA2 (b), sammenlignet med trykknivåer ved S1, S2, og S3. Rød graf betegner trykk som følge av åpning/lukking av ventil. 40	
Figur 15: Skisse som viser distribusjonsnettet fra kilden og inn til de to forsyningsområdene. Skissen viser også pumper og ventiler. Skissen til høyre viser distribusjonsnettets trykkmålere markert som røde punkter, hvorav ni nye punkter og to eksisterende punkter. Hentet fra (Bakker et al., 2013).....	41
Figur 16: Illustrasjon av forskjellen mellom statisk og dynamisk trykkstyring i Swarzędz-området.....	45
Figur 17: Utløpstrykk i vannledningen ved konvensjonell bruk av statisk trykkstyring med PRV (figurer til venstre), og dynamisk trykkstyring (figurer til høyre). ....	45
Figur 18: Timefaktorer over en 24-timers periode. To ulike forbruksmønstre ble skissert, et jevnt (smooth) og et ujevnt (peaked).....	53
Figur 19: Kart over vanddistribusjonsnettet som ble betraktet i analysen. ....	53
Figur 20: Trykkehøyde i det store systemet som funksjon av tid ved jevnt og ujevnt forbruksmønster. Grafene viser trykkehøyde ved bruk av PRV, RTC, samt ingen trykkkontroll....	57
Figur 21: Trykkehøyde i det lille systemet som funksjon av tid ved jevnt og ujevnt forbruksmønster. Grafene viser trykkehøyde ved bruk av PRV, RTC, samt ingen trykkkontroll....	58
Figur 22: Kostnader ved de tre scenariene. ....	61
Figur 23: Stort system. Prosentvis kostnadsreduksjon ved PRV og RTC sammenlignet med scenarie uten kontroll, som funksjon av variabel enhetskostnad for vann. ....	63
Figur 24: Lite system. Prosentvis kostnadsreduksjon ved PRV og RTC sammenlignet med scenarie uten kontroll, som funksjon av variabel enhetskostnad for vann. ....	64



---

## Tabelliste

Tabell 1: IWA vannbalanse etter topp-ned-metoden fra år 2000, oversatt til norsk i norsk vannsrapport 239 (Malm et al., 2018) .....	4
Tabell 2: Tabell som beskriver kategorisering av ulike ili-verdier etter anbefaling fra WHO. Inspirert av (Malm et al., 2018).....	6
Tabell 3: Gjennomsnittlig vannproduksjon i norske vannverk. Inspirert av (Ødegaard, 2014).....	8
Tabell 4: Oversikt over ulike trykkontrollelementer. disse elementene inngår i konvensjonell trykkstyring. etter inspirasjon fra (Moeslthe et al., 2020).....	23
Tabell 5: Tabell som viser forskjeller mellom statisk og dynamisk trykkstyring i Poznań og Swarzędz. ....	46
Tabell 6: Energibesparelser som følge av dynamisk trykkstyring. ....	47
Tabell 7: Innkjøpskostnader (€) for PRV i det store og det lille systemet, henholdsvis i størrelsene DN350 og DN125. ....	54
Tabell 8: Innkjøpskostnader (€) for RTC i det store og det lille systemet. Henholdsvis i størrelsene DN300 og DN100. ....	54
Tabell 9: Daglige tilførte vannvolum og lekkasjeandeler ved ulike scenarier i det store systemet. ....	56
Tabell 10: Daglige tilførte vannvolum og lekkasjeandeler ved ulike scenarier i det lille systemet. ....	56
Tabell 11: Årlig antall sprekker (nb) og årlig reparasjonskostnad (Cburst) som funksjon av maksimal daglig trykkhøyde (hmax) ved kontrollnode i det store systemet.....	59
Tabell 12: Årlig antall sprekker (nb) og årlig reparasjonskostnad (Cburst) som funksjon av maksimal daglig trykkhøyde (hmax) ved kontrollnode i det lille systemet. ....	60

---

# 1 Innledning

Det er en kjent problemstilling i internasjonal sammenheng at store mengder behandlet vann går tapt som følge av lekkasje i drikkevannsnettet/distribusjonsnettet. Store mengder vann blir transportert fra reservoarer til behandlingsanlegg eller direkte til forbruker. Samtidig går store volum til spille under transporten grunnet lekkasjer og skader underveis i ledningsnettet. Disse lekkasjene kan føre til opphopning av store mengder i vann enkelte områder, gjerne større mengder enn naturen og infrastrukturen klarer å håndtere. Resultatet kan bli lokale oversvømmelser, og skader på infrastruktur og bebyggelse. Samtidig utgjør dette en svært stor kostnad for samfunnet. Dette studiet tar sikte på å undersøke en konkret metode for reduksjon av lekkasjeandelen i det norske drikkevannsnettet. Denne metoden kalles aktiv trykkstyring, og som tittelen impliserer så er formålet med metoden å redusere lekkasjeandelen gjennom en kontrollert, kontinuerlig styring av trykket i drikkevannsnettet. Metoden går dermed ut på å benytte seg av dynamisk styring av ventiler og pumper, for å stille inn trykket i ledningsnettet etter tilstanden i nettet. Trykket skal gjenspeile trykkbehovet ved de aktuelle tidspunktene, slik at trykknivået blir optimalisert. Kort fortalt skal man forsøke å ikke overstige trykket mer enn det som er nødvendig ved ethvert tidspunkt. Formålet med denne praksisen er å redusere lekkasjeandeler i ledningsnettet. I tillegg bidrar dette til redusert vedlikeholdsbehov over tid. Som følge av et sterkere og mer robust nett, vil samfunnets kostnader knyttet til skader på ledningsnettet reduseres, samtidig som nettet vil fungere mer driftssikkert. Ettersom aktiv trykkstyring kan innebære kostbare tiltak er det nødvendig å undersøke hvorvidt iverksettelse av tiltak faktisk innebærer kostnadsbesparelser. Dette skjer gjennom en kost-nytte-analyse.

## 1.1 Problemstilling og forskningsspørsmål

Formålet med denne oppgaven er å skaffe en oppdatert oversikt over aktiv trykkstyring. Oppgaven skal belyse nåværende status på området: hvor mye kunnskap har man om aktiv trykkstyring? Hvilke erfaringer har man gjort seg ved bruk av aktiv trykkstyring i samfunnet, og hva slags litteratur finnes om temaet? Oppgavens formål blir dermed å undersøke og belyse kunnskapen om aktiv trykkstyring, spesielt hva angår erfaringer man har gjort seg, og hvilke studier som er utført i forbindelse med metoden aktiv trykkstyring. Et spesielt viktig fokus er hvilken effekt aktiv trykkstyring har for reduksjon av lekkasjeandel i drikkevannsnettet.

Problemstillingen i oppgaven er todelt: tilstanden ved et utvalg norske kommuner skal kartlegges. Videre skal det undersøkes hvorvidt kommunene har gjennomført tiltak for aktiv trykkstyring for å redusere lekkasjeandel. I den andre delen av oppgaven blir det undersøkt hvilke konkrete

---

resultater aktiv trykkstyring har gitt i forhold til lekkasjereduksjon i forsøk og case-studier av dette. Oppgaven skal også belyse hvilke tiltak som er iverksatt, samt økonomisk kost-nytte ved tiltakene.

Følgende forskningsspørsmål skal belyse problemstillingen som dette studiet søker å besvare.

Forskningsspørsmål ved spørreundersøkelse (kapittel 4):

- Hvordan er tilstanden i kommunene i forbindelse med lekkasjeandeler og kostnader for lokalisering, diagnostisering og utbedring av dette?
- Er det satt i gang tiltak for aktiv trykkstyring, og hvilke tiltak er i så fall iverksatt?

Forskningsspørsmål ved litteraturstudium (kapittel 5):

- Hvilke tiltak for aktiv trykkstyring er gjennomført i studiene?
- Bidro disse tiltakene til reduksjon av lekkasjeandel?
- Er tiltakene effektive i en kost-nytte-sammenheng?

## **1.2 Oppgavens struktur og utforming**

Denne oppgaven er gjennomført som et litteraturstudium. Det innebærer at kilder og kunnskap hovedsakelig innhentes fra eksisterende litteratur på fagfeltet. Rapporter, bøker og forskningsartikler vil være gode kilder til denne kunnskapen, og vil bli brukt aktivt i denne oppgaven. Dette vil danne grunnlaget for bakgrunnsdelen, som skal forklare hvilke prinsipper som ligger til grunn for metoden aktiv trykkstyring. Litteraturen skal også belyse aktiv trykkstyring, og hvordan dette er iverksatt, både i Norge og internasjonalt. Resultatdelen av oppgaven skal bestå av to deler: resultater hentet fra en spørreundersøkelse gjennomført hos fire relevante kommuner i Norge, samt et litteraturstudium som gjengir litteratur i forbindelse med aktiv trykkstyring. Kommunene i spørreundersøkelsen tilhører VASK-nettverket: et nettverk av de største norske kommunene i VA-sammenheng. Resultatdelen skal belyse hvilke praktiske erfaringer vi har i forbindelse med aktiv trykkstyring, og i hvor stor grad disse er tatt i bruk i Norge. Videre kommer litteraturstudiet inn som andre del av resultatene.

Denne oppgaven er skrevet med en tydelig rød tråd fra start til slutt. Det er ønskelig å gi leseren en introduksjon til temaet gjennom å forklare teorien som ligger til grunn for VA-modellering og hydraulikk. Oppgaven introduserer dermed prinsipper som brukes innen fysikken og ingeniørkunsten, slik at leseren har et godt teoretisk utgangspunkt for forståelsen av hydromekanikk og hydraulikk. Leseren skal også få en gjennomgang om vannets forbruksmønster i samfunnet, gjennom hele døgnet. Teoridelen går gjennom ledningsteknologi og materialer, samt litt om ventiler som tas i bruk for reduksjon av trykk.

---

Kapittel 4 i oppgaven går deretter inn på aktiv trykkstyring, og hvordan dette fungerer i praksis. Kapittelet forklarer aktiv trykkstyring i detalj: hvilke tiltak og metoder som skal brukes, og hvordan dette fungerer i praksis. Kapittel 5 tar for seg den økonomiske delen av oppgaven. Hvor store kostnader er knyttet til diagnostisering og implementering av tiltak?

## **2 Bakgrunn**

### **2.1 Drikkevannsnett**

Drikkevannsnett er et landsomspennende nettverk av underjordiske ledninger. Ifølge Norsk Vann består det norske ledningsnett av 41 000 km med vannledninger (Skjærstad, 2013). Ledningene knytter forbrukerne av vann med viktig infrastruktur slik som vannbehandlingsanlegg, pumpestasjoner og vannreservoarer, og er av avgjørende betydning før tilfredsstillende leveranse av rent vann kan finne sted. Drikkevannsnett, også kalt distribusjonsnett, fungerer som et ledningsnett for distribusjon av rent drikkevann til private husstander, til offentlige bygg og næringsseidom og andre passende mottakere, eller resipienter.

For at drikkevannsnett skal fungere optimalt stilles det strenge krav til vannets renslighet. Samtidig må infrastrukturen kunne levere en tilfredsstillende drift for å være i stand til å forsyne abonnenter med tilstrekkelige mengder rent vann på en trygg og effektiv måte. Det kreves derfor ifølge Ødegaard (2014) et komplisert nettverk av ulike typer infrastruktur for å kunne sørge for dette, blant annet:

- Overføringsledninger/overføringstunneler
- Pumpestasjoner
- Fordelingsledninger/tappeledninger
- Utjevningsmagasin og høydebasseng

### **2.2 Lekkasje i drikkevannsnett**

#### ***2.2.1 Lekkasjeandel i Norge***

I Norge ligger lekkasjeandelen på omtrent 31 %, noe som gjør Norge til et av landene i Europa med høyest lekkasjeandel. I enkelte vannforsyninger kan tapsprosenten være oppe i over 40 % av rensset vann (Malm et al., 2018). Dette medfører store kostnader for samfunnet, ettersom distribusjon og rensing av vann utgjør en betydelig kostnad. Det forekommer stor usikkerhet i forbindelse med beregning av lekkasjeestimat. Årsaker til dette kan være vanskeligheter med å estimere kostnader, ettersom det er vanskelig å lokalisere lekkasjer, samt at mye av infrastrukturen er gravet ned.

### 2.2.2 Årsaker til lekkasje

Lekkasje oppstår som følge av sprekker og hull på ledninger. Dette innebærer at det oppstår sprekker i ledningene som følge av ulike årsaker, blant annet korrosjon av materialet over tid. Et eksempel på dette kan være rustreaksjon på eldre støpejernsrør som har vært i drift over mange tiår, kanskje opptil over 100 år i drift. Andre faktorer som spiller inn er mekanisk slitasje på rørmaterialet over tid, som følge av belastning fra jord og infrastruktur over materialet.

### 2.2.3 IWAs vannbalanse

Dette delkapittelet er basert på Norsk Vanns rapport 239 av Malm et al. (2018). Beregning av lekkasjemengde kan skje etter ulike modeller. En anbefalt og hyppig brukt metode ble lansert av International Water Association (IWA) i år 2000. IWA er en internasjonal forening bestående av personer som utgjør et nettverk av profesjonelle knyttet til VA. Foreningen har utarbeidet en oversikt over vannbalansen som er presentert i Tabell 1.

Tabell 1: IWA vannbalanse etter topp-ned-metoden fra år 2000, oversatt til norsk i norsk vannsrapport 239 (Malm et al., 2018)

Leverte vannvolum til kommunens vann-nett. Vann fra eget vannverk og importert vannvolum.	Legalt forbruk	Fakturert legalt forbruk	Fakturert målt forbruk	Fakturert vann
			Fakturert ikke målt forbruk	
	Vanntap	Ikke fakturert legalt forbruk	Ikke fakturert målt forbruk	Ikke fakturert vann
			Ikke fakturert ikke målt forbruk	
		Virkelig vanntap	Illegalt forbruk	
			Vanntap kommunale vannledninger	
	Vanntap private stikkledninger			

IWAs vannbalanse fordeler vannforbruket etter legalt forbruk, samt vanntap. Denne oppdaterte utgaven av vannbalansen inkluderer vann produsert i kommunale vannbehandlingsanlegg, eller importert vann fra andre vannverk.

Vannbalansen inkluderer både legalt forbruk, og vanntap:

**Legalt forbruk** – Vann som er fakturert og godkjent av kommunen eller tilsvarende myndigheter.

**Vanntap** – Illegalt forbruk som ikke er godkjent til bruk. Inkluderer også vanntap i private og kommunale ledninger.

#### Punkter i vannbalansen – Legalt forbruk

Fakturert legalt forbruk – Forbruk av registrerte abonnenter, målt med vannmåler. Dette kan inkludere private husstander, eller andre autoriserte forbrukere med vannmåler. Inkluderer også fakturert forbruk uten måling. Dette er husstander og autoriserte forbrukere uten vannmåler.

---

Ikke fakturert legalt forbruk – Forbruk av husstander eller andre autoriserte mottakere uten vannmåler. Kan være offentlige bygninger, parker eller offentlige institusjoner. Brannvann inngår også i denne kategorien.

Tilsynelatende vanntap – Inkluderer illegalt forbruk av vann som ikke knyttes til lekkasje eller andre tekniske faktorer i distribusjonsnettet.

Virkelige vanntap – Inkluderer vanntap knyttet til lekkasje i kommunale vannledninger, samt lekkasje i private stikkledninger inn til privat eiendom.

(Malm et al., 2018)

#### **2.2.4 Beregning av vanntap ved CARL, UARL og ILI**

Ofte benyttes CARL, UARL og ILI ved beregning av vanntap gjennom lekkasjer. Metoden blir lagt frem i dette delkapittelet. Følgende delkapittel beskrives av Malm et al.

##### **CARL**

«Current annual real losses» (CARL) betegner det virkelige vanntap for et distribusjonssystem grunnet gradvis svekkelse av ledningen. Over tid vil det oppstå større CARL-verdier som følge av eldelse av vannledningen. Dermed vil det naturlige vanntap over tid øke, og føre til stadig mindre optimal vannforsyning.

##### **UARL**

«Unavoidable annual real losses» (UARL) betegner tap som er teknisk uunngåelige over tid. Disse tapene kan ikke motvirkes av økonomiske ressurser tilgjengelig.

IWA har utarbeidet en formel som blant annet baserer seg på trykkenergien i ledningen:

$$UARL = (18 * L_M + N_S * (0,8 + 0,025 * L_P)) * P$$

(Malm et al., 2018) (Formel 1)

Hvor

UARL = Uunngåelige vanntap [L/døgn]

$L_M$  = Ledningslengde [km]

$N_S$  = Antall stikkledninger

$L_P$  = Lengden på stikkledninger [m]

$P$  = Trykk [m]

##### **ILI**

“Infrastructure leakage index” (ILI) beskriver forholdet mellom CARL og UARL:

$$ILI = \frac{CARL}{UARL}$$

(Malm et al., 2018) (Formel 2)

Hvor

ILI = Dimensjonsløst svar som angir forholdet mellom CARL og UARL [dimensjonsløst]

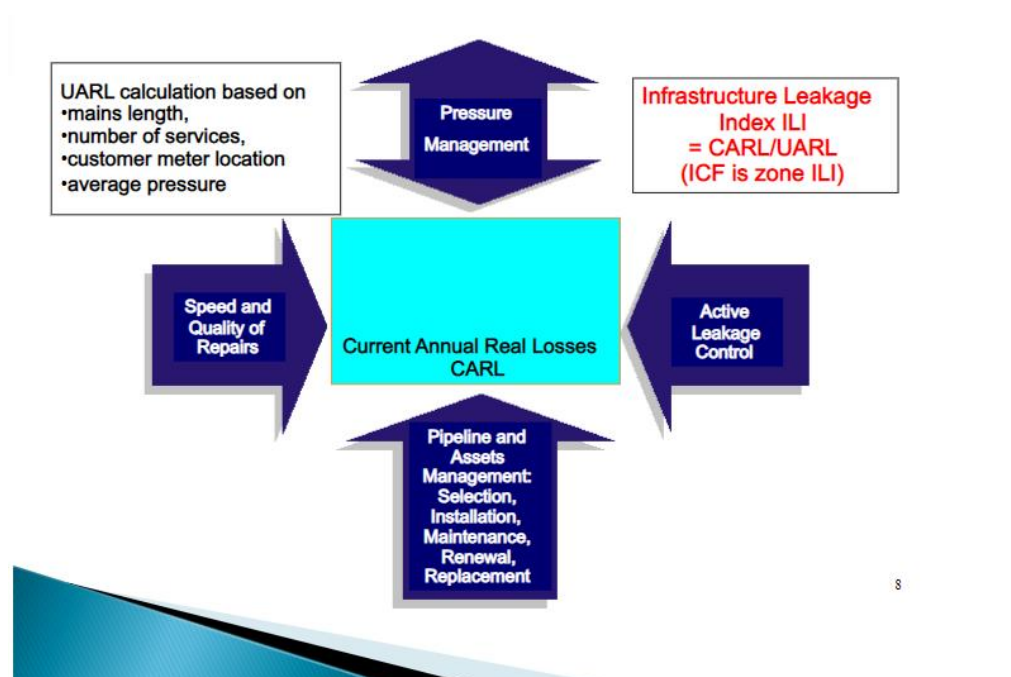


Tabell 2: Tabell som beskriver kategorisering av ulike ili-verdier etter anbefaling fra WHO. Inspirert av (Malm et al., 2018)

ILI-verdi	Skala basert på WHO's anbefalinger					
ILI = CARL/UARL	>3,5	3-3,5	2,5-3	2-2,5	2-1,5	<1,5
	Ikke akseptabelt	Dårlig	Litt dårlig	OK	God	Utmerket

### 2.2.5 Fokus på lekkasjereduksjon

Vann er å betrakte som en knapp ressurs på tross av at over 70 % av jordens overflate er dekket av vann. Dette har sammenheng med at kun 0,5-1 % av ferskvann er enkelt tilgjengelig for mennesker for å kunne benyttes som drikkevann (Bureau of Reclamation, 2020). Klimaendringer og risiko for tørke og andre naturkatastrofer utgjør en trussel for tilstrekkelig forsyning av fremtidens ferskvann. I enkelte land, deriblant Norge, knyttes det store kostnader til rensing og distribusjon av trygt drikkevann. Det er derfor satt et stort søkelys på lekkasjereduksjon over hele verden.



Figur 1: Illustrasjon av tiltak for å redusere lekkasjeandel. (Columbia Basin Trust, 2013)

Figur 1 viser hvilke tiltak som kan gjennomføres for reduksjon av lekkasjeandel i drikkevannsnettet. Illustrasjonen viser at lekkasjereduksjon kan påvirke størrelsen på ulike komponenter ved lekkasje, nærmere bestemt reelle årlige utslipp (CARL) som overstiger det økonomisk tillatte nivået.

---

## 2.3 Forbruksmønster og døgnvariasjoner

Det ble produsert ca. 700 millioner m<sup>3</sup> rent vann ved norske vannverk, noe som innebærer at det blir forbrukt langt mindre volum enn vannressurser som er tilgjengelig. Vannet blir hovedsakelig brukt av private husstander, eller andre private abonnenter, industri, samt landbruk (Ødegaard, 2014). Dette underkapittelet undersøker forbruksmønster og døgnvariasjon, for å gi et innblikk i et svært viktig hensyn å ta ved trykkoptimalisering. Delkapittelet er basert på Ødegaard (2014).

### 2.3.1 Totalt vannforbruk

Hele systemet for distribusjon av vann skal tilfredsstillende en stor årlig etterspørsel etter vann. Etterspørselen består av flere underkomponenter som krever vann til ulike formål. Etterspørselen kan ifølge Ødegaard (2014) enkelt beskrives ved følgende likning:

$$Q_T = Q_h + Q_i + Q_o + Q_a + Q_t$$

(Formel 3)

Hvor:

$Q_T$  = Det totale behovet for vann til dekning av hele forbruket samt lekkasjeandeler [m<sup>3</sup>/år]

$Q_h$  = Vannbehov hos husholdninger [m<sup>3</sup>/år]

$Q_i$  = Vannbehov hos industrien [m<sup>3</sup>/år]

$Q_o$  = Offentlig vannbehov hos skoler, sykehus og lignende virksomheter [m<sup>3</sup>/år]

$Q_a$  = Vannbehov til andre formål, for eksempel vanning og hagestell [m<sup>3</sup>/år]

$Q_t$  = Vanntap, eksempelvis sløsing og lekkasjer [m<sup>3</sup>/år]

Dette innebærer at hele denne vannforsyningen må dekkes gjennom vannverkene produksjon.

---

### 2.3.2 Variasjoner i produksjon og vannforbruk

#### Generelt vannforbruk

En kan se en generell nedgang i totalt volum produsert vann over tid. Dette presenteres i Tabell 3. Ødegaard (2014) lister opp gjennomsnittlig vannproduksjon i norske vannverk, oppgitt i liter per person hvert døgn:

Tabell 3: Gjennomsnittlig vannproduksjon i norske vannverk. Inspirert av (Ødegaard, 2014)

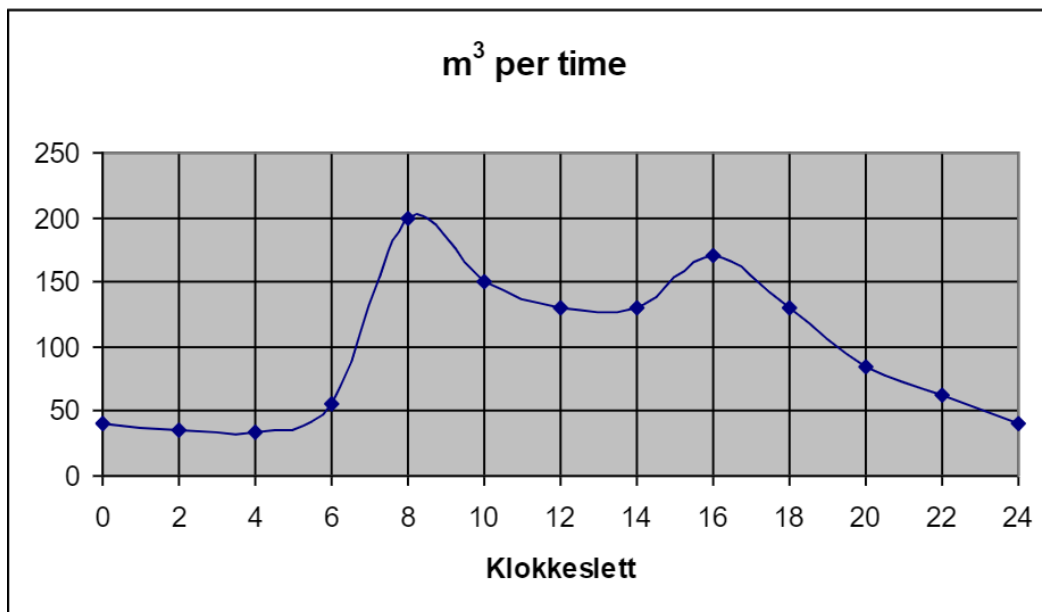
År	Vannproduksjon [l/(p*d)]
1996	596
1999	533
2001	558
2004	521
2006	490
2009	472

Trenden viser at den produksjonen generelt har sunket. Dette innebærer at den norske lekkasjeandelen har gått ned over tid, som nevnt tidligere. På tross av at denne trenden er positiv, vil årsakene til vannlekkasjene fortsatt bestå. Reduksjonen skyldes derfor hovedsakelig lavere forbruk av vann.

Forbruket av vann hos husholdninger er stort sett lik fra kommune til kommune. De store variasjonene ligger det faktum at det eksisterer stor variasjon i vannbehov hos industrien og landbruket i hver enkelt kommune. Norges midlere vannforbruk i 2006 lå på 300 l/(p\*d), noe som vitner om svært høyt forbruk i forhold til de fleste andre land. Vannproduksjonen er langt høyere enn gjennom vannforbruket, hvilket innebærer at det tas hensyn til svært høye lekkasjeandeler.

#### Forbruksvariasjoner

Det eksisterer store variasjoner av vannforbruk gjennom et døgn. Dette er intuitivt, ettersom vannbehovet vil være stort før arbeidstid om morgenen, og like etter arbeidstid på ettermiddagen. På dette tidspunktet vil vannforbruket i private husstander kunne være over dobbelt så høyt sammenlignet med midlere forbruk gjennom resten av døgnet.



Figur 2: Et eksempel på forbruksvariasjon gjennom et døgn. Grafen beskriver et typisk tilfelle av døgnvariasjoner, med toppunkter ved morgen og ettermiddag. (Ødegaard, 2014)

Slik det kommer frem i Figur 2 vil døgnvariasjonene variere mye gjennom døgnet. Behovet for tilfredsstillende infrastruktur er derfor til stede, da svingninger i etterspørsel på timesbasis vil gjøre distribusjonssystemet svært sårbart og kostbart. Disse variasjonene i forbruk utjevnes ved såkalte utjevningsreservoarer, ofte i form av høydebasseng. Disse reservoarene har som oppgave å møte denne svingningen i etterspørsel for å unngå installasjon av store pumpeanlegg, samt legging av vannledninger med stor diameter.

### Beregning av vannforbruk

Det er utviklet metoder for beregning av vannforbruk gjennom døgnet. Slike beregninger er nødvendige for å kunne dimensjonere og bygge distribusjonssystemer med tilfredsstillende drifts- og leveransesikkerhet.

Ved beregning av vannbehov i ulike situasjoner der det tas høyde for forbruksvariasjoner, er følgende koeffisienter blitt introdusert:

$f_{maks}$  - Representerer maksimalt vannforbruk i løpet av et års totale antall døgn. Oppgis som en faktor mellom årets døgn med høyest forbruk, og midlere døgnforbruk.

$f_{min}$  - Representerer minimalt døgnforbruk i løpet av et års totale antall døgn. Oppgis som en faktor mellom årets døgn med lavest vannforbruk, og midlere døgnforbruk.

$k_{maks}$  - Representerer maksimalt timesforbruk i løpet av et døgn. Oppgis som faktor mellom maksimalt timesforbruk og midlere timeforbruk.

---

$k_{min}$  – Representerer minimal tidsforbruk i løpet av et døgn. Oppgis som faktor mellom minimal tidsforbruk og midlere tidsforbruk.

Formel for beregning av maksimalt/minimalt vannforbruk vil kunne inkludere forbruk fra husstander, industri, forbruk klassifisert som «annet», etc. Et eksempel på formel for beregning av maksimalt er formel. I denne formelen tas det høyde «annet-forbruk» samt husholdningers forbruk i maksimal forbrukssituasjon:

$$Q_{maks} = \frac{P * Q_h * f_{maks} * k_{maks} + P * Q_a * 3 + P * Q_{lekk}}{24 * 60 * 60}$$

(Formel 4)

Hvor:

$P$  = Antall personer i området

$Q_{maks}$  = Maksimalt forbruk i årets mest forbrukende time [l/s]

$Q_h$  = Midlere spesifikt forbruk i husholdninger [l/(p\*d)]

$Q_a$  = Annet-forbruk [l/(p\*d)]

$Q_{lekk}$  = Lekkasjer i området per person per døgn [l/(p\*d)]

Merk at «annet-forbruk» vil multipliseres med 3. I dette eksempelet tas det høyde for at annet-forbruk kun finner sted i løpet av 8 timer per døgn, og at det derfor må korrigeres for å samsvare med et helt døgnforbruk. Slike parametere varierer i ulike situasjoner, og likningen kan benyttes til å se på maksimal og minimalt forbruk, samt inkludere forbruk innen forskjellige kategorier. (Ødegaard, 2014)

## 2.4 Generell hydromekanikk og hydraulikk

Denne delen tar for seg prinsipper innen hydraulikk og hydromekanikk. Dette delkapittelet skal belyse de fysiske prinsippene som ligger til grunn for strømninger, trykk og lekkasje.

### 2.4.1 Kontinuitet

Dersom en væskes tetthet er konstant, kalles dette en inkompressibel væske. Ved inkompressible strømninger vil man kunne ta i bruk kontinuitetslikningen basert på likningen for volumstrøm. Kontinuitetslikningen kan uttrykkes matematisk som:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

(Auen Grimenes et al., u.å.) (Formel 5)

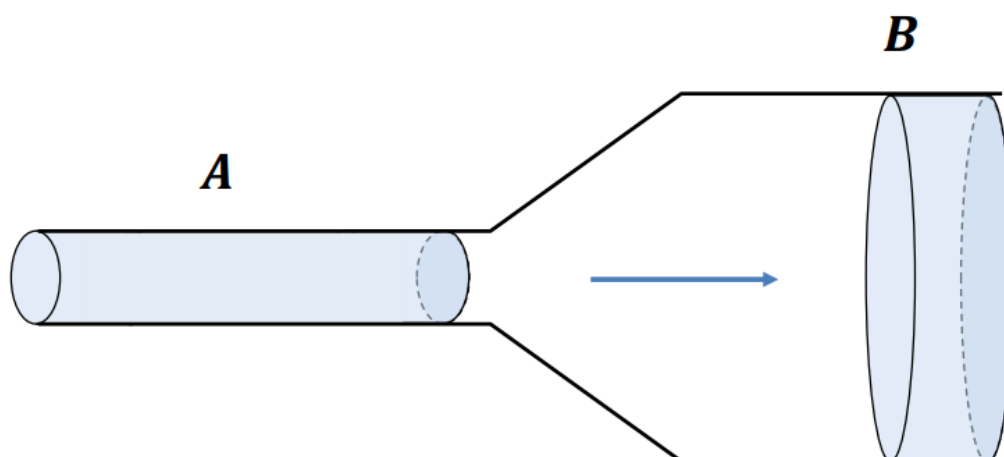
Hvor

$Q$  = Vannføring [m<sup>3</sup>/s]

$A_{1/2}$  = Areal av tverrsnitt 1 og 2 [m<sup>2</sup>]

---

$v_{1/2}$  = Vannets midlere hastighet [m/s]



Figur 3: Prinsippskisse av kontinuitetsprinsippet. Figuren viser at vannets hastighet er omvendt proporsjonal med tverrsnitts-arealet. (Norsk Vann, 2019)

Figur 3 viser at det fargelagte volumet i punkt A og punkt B skal passeres på samme tid. Dette innebærer at vannstrømningen i punkt A må bevege seg raskere gjennom trangere tverrsnitt. I punkt B kan vannet strømme langsommere, fordi vannet fordeles over et sylindervolum med større areal.

Kontinuitetsprinsippet i kombinasjon med prinsippet om energibevaring kan kombineres for å gi en mer helhetlig forståelse over hvordan disse prinsippene er av betydning innen fluidmekanikk og hydraulikk. Dette gjøres i neste delkapittel.

#### **2.4.2 Bernoullis prinsipp**

For en væskes strømning gjennom et ledningsstreck vil det være hensiktsmessig å benytte Bernoullis likning for beregning av hastighet og trykk. Bernoullis likning er et tilfelle av bevaring av energi, og inkluderer ledd av flere forskjellige typer energi. Bernoulli likningen betrakter energibalansen i to ulike tverrsnitt langs samme strømlinje i en strømning.

#### **Bernoullis likning på høydeform**

Det er ofte hensiktsmessig å uttrykke Bernoulli på høydeform. Her vil samtlige ledd i likningen benytte seg av dimensjon for lengde, m. I dette tilfellet betrakter man hvert ledd i likningen som en form for energi ved strømningen. I noen tilfeller betrakter man tap som følge av legemer som befinner seg i strømningens bane, og som påfører motstand og friksjon motsatt strømningens retning. Slike tap kalles singulærtap.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_p = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_L$$

(Subramanian, 2014)(5)

Hvor

$p_{1/2}/\rho g$  = Statisk trykkhøyde i punkt 1/2 [m]

$g$  = Tyngdeakselerasjon [9,81 m/s<sup>2</sup>]

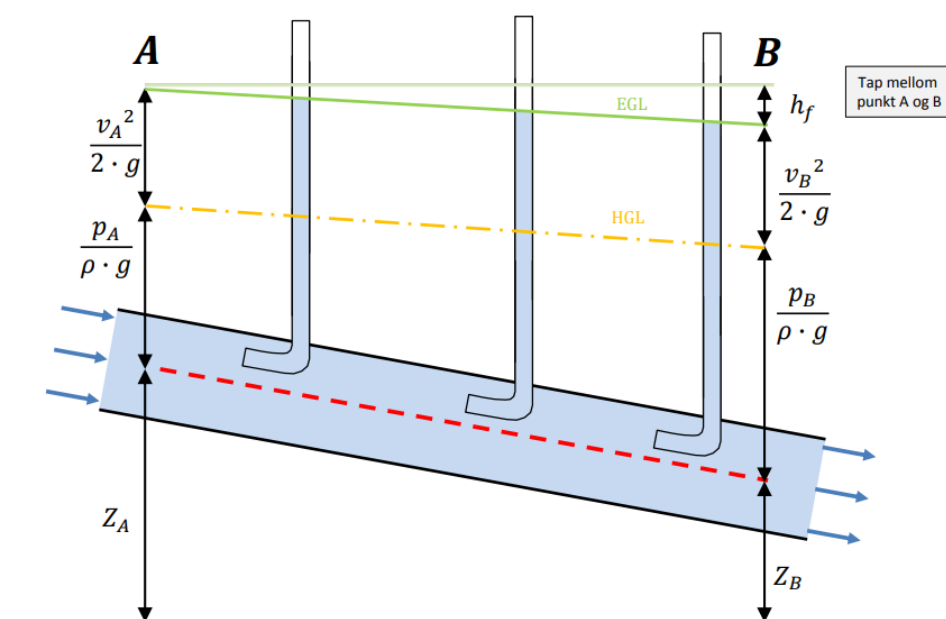
$Z_{1/2}$  = Strømningens høyde over datum i punkt 1/2 [m]

$H_L$  = Tapshøyde [m]

$v_{1/2}^2/2g$  = Hastighetshøyde ved punkt 1/2 [m]

$H_p$  = Høyde tilført av pumpe [m]

Det legges til et ledd for tapshøyde i slutten av likningen. Dette leddet representerer tap som følge av friksjon under strømning. Under skissering av en strømning benyttes det ofte en energilinje (EGL), og en trykklinje (HGL). Avstanden mellom linjene bestemmes av hastighetshøyden som betegner tap i trykkhøyde. Dette skyldes vannets strømning med farten « $v$ » gjennom røret (Ødegaard, 2014).



Figur 4: Illustrasjonen tar hensyn til energilinjes (EGL) helning som følge av friksjonstap ( $h_f$ ). (Norsk Vann, 2019)

### 2.4.3 Friksjonstap

#### Reynoldstall

Følgende avsnitt er basert på artikler fra Store norske leksikon om Reynoldstall av Helseth (2020), og viskositet av Holtebekk (2019). Viskositet er et mål på en væskes seighet, eller hvor enkelt en væske kan strømme. Jo lavere viskositeten er, desto enklere strømmer væsken. Viskositet oppgis i enheten Pascal multiplisert med sekund, altså [Pa\*s]. Viskositeten er av sentral betydning for å bestemmes en strømnings reynoldstall. Reynoldstall er en dimensjonsløs størrelse som beskriver hvorvidt en strømming er laminær eller turbulent. Under strømmingen av en væske vil det virke friksjonskrefter mellom strømningslinjene i en væske, og væsken eller materialet som strømmingen vekselvirker mellom. Reynoldstallet er en funksjon av diameter på røret som vannet strømmer gjennom, vannets massetetthet, strømmingens gjennomsnittshastighet, samt vannets viskositet. En figur som visualiserer forholdet mellom laminære og turbulente strømminger, er presentert i Figur 5.

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}$$

(Helseth, 2020)(Formel 6)

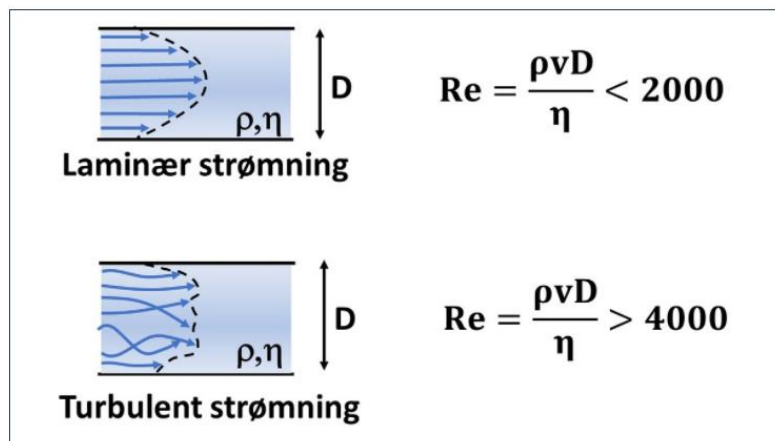
Hvor

Re = Reynoldstall [dimensjonsløs]

D = Rørets diameter [m]

$\rho$  = Væskens massetetthet [1000 kg/m<sup>3</sup> for ferskvann]

$\eta$  = Væskens viskositet [Pa\*s]



Figur 5: oversikt over laminær ( $Re < 2000$ ) og turbulent ( $Re > 4000$ ) strømming. (Helseth, 2020)

#### Ruhet

Ruhet er en sentral faktor å ta høyde for innen VA-hydraulikk. Ruhet betegner en overflates ujevnheter sammenlignet med en ideell form på materialet, og medfører energitap underveis i en strømming som følge av friksjon mellom vannstrømmingen og rørmaterialets overflate.



## Friksjonstap

Friksjonstapet underveis i strømmingen vil negativ helning på energilinen. Dette skyldes dermed at en del av energien går tapt som følge av friksjonen underveis i strømmingen mellom materialet og vannstrømmen.

## Bestemmelse av friksjonstap

Ved bestemmelse av trykkfallsleddet i Bernoulli-likningen, kan Darcy-Weisbachs likning for friksjonstap benyttes:

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

(Norsk Vann, 2019) (Formel 7)

Hvor

$h_f$  = Friksjonstap/trykkfall [m]

$f$  = Friksjonsfaktor [dimensjonsløs]

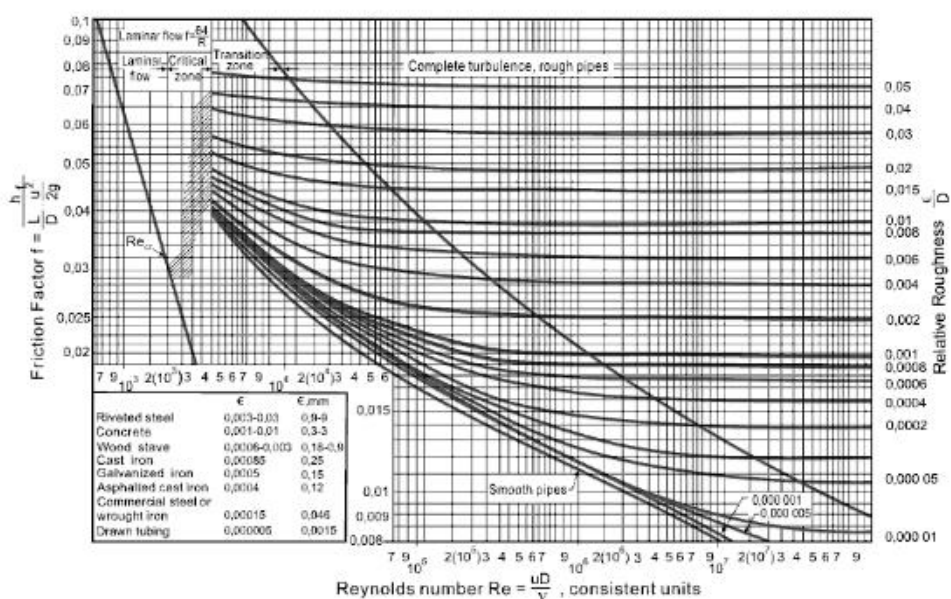
$L$  = Lengde på rørstrekk [m]

$D$  = Diameter på rørstrekk [m]

$v$  = Vannets hastighet [m/s]

$g$  = Tyngdeakselerasjon [9,81 m/s<sup>2</sup>]

Darcy-Weisbachs likning er en tilnærming til Coolebrook-Whites likning for bestemmelse av friksjonsfaktor. Et moody-diagram benyttes til å gi en grafisk fremstilling av Coolebrook-White, som bestemmer friksjonsfaktoren basert på avlesning fra et diagram hvor strømmingens reynoldstall og ruhet er avgjørende variabler for bestemmelse av friksjonsfaktor.



Figur 6: Moody-diagram for bestemmelse av friksjonsfaktor. Hentet fra (Engineers Edge, u.å.)

---

## Trykk – sammenheng mellom trykk og lekkasje

### 2.4.4 Trykk

Trykket i vannledning har stor betydning for vannforsyningen, og er ofte avgjørende for om forsyningsnettet klarer å levere vann til resipienter. Trykk er et sentralt tema i denne oppgaven, og mye av fokuset på lekkasjereduksjon vil heretter være knyttet til betraktninger av trykk og dets resultat på ledningsnettet.

### 2.4.5 Lekkasjevannføring som funksjon av trykk

Det eksisterer en klar sammenheng mellom trykk i et vannledningsnett, og tilsvarende lekkasjeandel langs ledningsnettet. I Norsk Vanns rapport 263 beskriver Flatin et al. (2021) følgende sammenheng mellom trykknivå og lekkasje:

$$\frac{Q_{lekk,etter}}{Q_{lekk,før}} = \left( \frac{P_{etter}}{P_{før}} \right)^{N1}$$

(Flatin et al., 2021) (Formel 8)

Hvor

$Q_{lekk,etter}/Q_{lekk,før}$  = Forhold som angir lekkasjevannføring før/etter trykkendring [ $m^3/s$ ]

$P_{etter}/P_{før}$  = Forhold som angir trykknivå før/etter trykkendring [bar]

$N1$  = Eksponent for sammenheng mellom lekkasjetap, og tilhørende trykk [Dimensjonsløs]

$N1$ -eksponenten varierer vanligvis mellom 0,5 og 2,5. Nærmere forklaring på årsaker til denne variasjonen gis på neste side.

Toricelli-likningen beskriver hastigheten til en vannstråle som en funksjon av gravitasjon og trykkehøyde:

$$v = \sqrt{2gh}$$

(Formel 9)

Hvor

$v$  = Teoretisk vannhastighet [m/s]

$g$  = tyngdeakselerasjon 9,81 [ $m/s^2$ ]

$h$  = Trykk [mVs]

Likningen beskriver strømmingen av en jet-stråle gjennom en åpning i en ledning, men er noe forenklet i forhold til en del realistiske scenarier. En modifisert utgave av Toricelli-likningen beskriver vannføring ut av en åpning som en funksjon av parameterne nevnt over, i tillegg til en strømningskoeffisient. Strømningskoeffisienten bestemmes basert på væskens spesifikke tyngde,

---

samt trykkdifferansen i strømningsregimet. Likningen tar hensyn til åpningens utforming. Likningen tar også hensyn til arealet av åpningen, og i ledningen som vannet strømmer ut av (Deyi et al., 2014). Den modifiserte toricelli-likningen går som følger:

$$Q = C_d A \sqrt{2gh}$$

(Piller & van Zyl, 2014)(Formel 10)

Hvor

Q = Vannføring [m<sup>3</sup>/s]

C<sub>d</sub> = strømningskoeffisient [dimensjonsløs]

A = Areal av åpningen som strømmingen går gjennom [m<sup>2</sup>]

En komprimert utgave av likning har blitt introdusert for å forenkle likningen noe. Den komprimerte utgaven av likningen inkluderer også en eksponent N1 for å ta hensyn lekkasjemodellen i hvert enkelt scenario (Deyi et al., 2014). Likningen blir dermed:

$$Q = Ch^{N1}$$

(Piller & van Zyl, 2014)(Formel 11)

Hvor

C = Koeffisient for lekkasjemodell [dimensjonsløs]

h = Trykkvariabel [m]

N1 = Eksponent til lekkasjemodellkoeffisienten [dimensjonsløs]

N1-eksponenten er en dimensjonsløs størrelse som beskriver størrelsen på vannføring. Eksponenten varierer vanligvis mellom 0,5 og 2,79 basert på erfaringer gjort i feltstudier og eksperimenter.

Faktorer som er relevante ved bestemmelse av eksponenten vil være faktorer som avgjør trykk og lekkasje i en ledning. Disse fire faktorene antas ifølge Devi et al. (2014) å være:

- Egenskaper ved rørmaterialet
- Lekkasje-hydraulikk, som følge av utforming på åpningen samt faktorer som vannføring i røret og trykkenergi
- Hydrauliske egenskaper ved utstrømning til jord eller andre relevante medium
- Vannforbruk

Fra tidligere erfaringer er det kjent at lekkasjeandel kan beskrives med følgende likning:

$$Q = k * \sqrt{P}$$

(Shammas & Al-Dhowalia, 1993) (Formel 12)

Der

k = Proporsjonalitetskonstant [dimensjonsløs]

---

P = Trykkfall til strømning gjennom åpning [mVs]

### FAVAD-konseptet

Lekkasje innebærer en stor utfordring innen utforming av VA-infrastruktur, samt for samfunnet generelt. Det er derfor satt et søkelys på å utforme så nøyaktige modeller som mulig for å modellere lekkasjeandel, og hydraulikken som ligger til grunn for dette. Det er derfor utarbeidet mer nøyaktige modeller for å beskrive sammenheng mellom lekkasjeandel og trykk ved hjelp av FAVAD-modellen (Fixed and Variable Area Discharges) (Piller & Van Zyl, 2014).

Den modifiserte likningen i henhold til FAVAD-konseptet tar hensyn til at lekkasjeåpningen som vannet strømmer gjennom ikke lenger skal betraktes som en konstant åpning med fast geometri. Åpningen skal betraktes som elastisk, slik at åpningsarealet kan endre seg basert på ulike faktorer, som trykk, temperatur og materialets egenskaper. (Deyi et al., 2014; Piller & Van Zyl, 2014)

Den modifiserte FAVAD-likningen tar hensyn til arealet av åpning som en funksjon av trykket:

$$A(h) = mh + A_0$$

(Formel 13)

Hvor

$A(h)$  = Arealet som funksjon av trykk [ $m^2$ ]

$h$  = trykkehøyde [m]

$m$  = gradienten/helningen til trykkehøyde-arealet

(Deyi et al., 2014; Piller & Van Zyl, 2014)

May (1994) som referert til av Deyi et al., (2014) introduserte dermed en modifisert utgave av likningen hvor likning  $A(h)$  settes inn for  $Q(Cd)$ :

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + mh^{1.5})$$

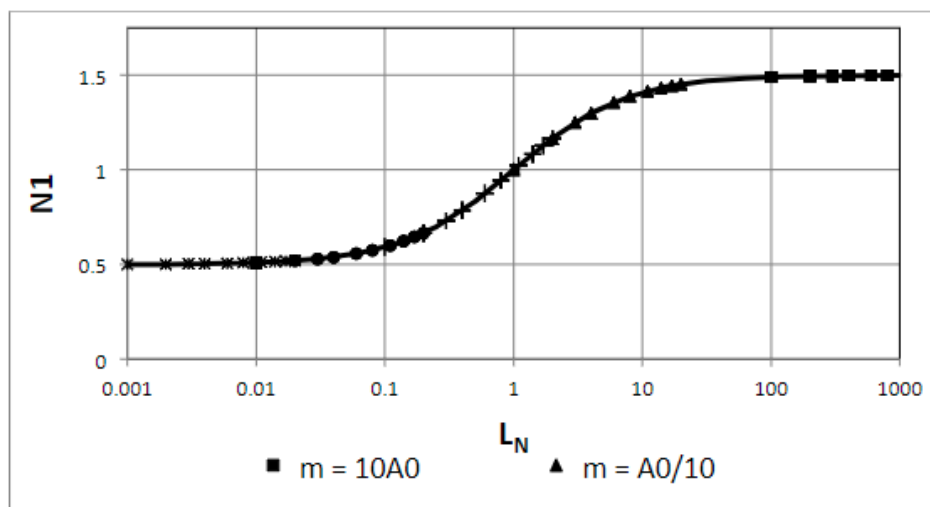
(Formel 14)

Likningen fremstiller en mer nøyaktig matematisk sammenheng mellom trykk og vannføring. Videre undersøkelser ble gjennomført for å kartlegge sammenhengen mellom den mer konvensjonelle likning 3, og FAVAD 5. En likning for lekkasjetall ( $L_N$ ) ble definert som forholdet mellom variable og faste lekkasjeandeler. Likningen er nyttig, fordi man gikk bort fra perspektivet om et konstant åpningsareal for vannstrømning, til fordel for å betrakte åpningen som økende. Likningen går som følger:

$$L_N = \frac{mh}{A_0}$$

(Cassa & Van Zyl, 2013; van Zyl & Cassa, 2014)(Formel 15)

Hvor  $L_N$  er det dimensjonsløse forholdstallet mellom variable og faste lekkasjetall. Det ble gjennomført undersøkelser av lekkasjetall ved ulike  $m/A_0$ -forhold ved følgende utvalg: {0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1}, og ti ulike trykkverdier mellom 0.00001 og 200 m.



Figur 7: Grafisk fremstilling av forholdet mellom lekkasjetall, og lekkasjeeksponent Hentet fra (van Zyl & Cassa, 2014)

Figur 7 viser at for  $L_N$ -verdier under 0,01 vil  $N1$  stabilisere seg på 0,5. Ved  $L_N$ -verdier over 100 vil  $N1$  stabilisere seg på ca. 1,5. Figur 6 er en grafisk fremstilling av følgende likning:

$$N1 = \frac{1.5L_N + 0,5}{L_N + 1}$$

(van Zyl & Cassa, 2014) (Formel 16)

Dette delkapittelet viser en klar og tydelig sammenheng mellom trykk og lekkasjeandel, og vil være et svært viktig hensyn å ta i videre arbeid aktiv trykkstyring.

## 2.5 Pumper

Et vanddistribusjonssystem er avhengig av gode driftsforhold for å være i stand til å tilfredsstillende forbruket. Systemet skal kunne levere store mengder rent vann, og samtidig operere under tilfredsstillende driftssikkerhet. Trykk er særskilt viktig, fordi tilstrekkelig trykk er avgjørende for leveranse og overføring av vann. Trykk er også viktig sett i et helsemessig perspektiv. I mange tilfeller kan gravitasjon alene sørge for tilstrekkelig trykk til gunstig drift. Dette kalles selvføll og baseres på vannkildens geografiske, vertikale høyde i terrenget. Selvføll er en foretrukket måte å transportere vannet på, da det er svært energikrevende å benytte seg av pumper og pumpestasjoner. (Ødegaard, 2014)

---

Pumper er teknologiske innretninger som øker en fluides trykk ved hjelp av elektrisk energi. Pumpen brukes dermed til å forflytte en fluide fra et område med lavere trykk til et område med høyere trykk. Dette henger sammen med høydeforskjeller, og brukes ofte for å transportere vann fra lavereliggende reservoarer til resipienter i større høyde.

Pumper kan vanligvis klassifiseres som strømningspumper eller fortrenningspumper, som utgjør to hovedkategorier av pumper i bruk i distribusjonsnett. Videre inndeles strømningspumper inn i aksial- og radialpumper. En radialpumpe baserer seg på flyten av vann langs radien av drivakselens rotasjon. En propellpumpe vil sørge for strømning langs akselen av pumpen. En fortrenningspumpe vil brukes ved strømninger der det stilles strengere krav til høyt trykk. Volumstrøm vil variere med rotasjonshastigheten til pumpen, og ikke trykket. Dermed oppnås et konstant fortrenningsvolum.

### **2.5.1 Prinsippet bak pumpen**

Pumper baserer seg på prinsippet om at energihøyden skal økes ved utløpet av pumpen. Pumpens virkningsgrad bestemmes av følgende likning:

$$\eta = \rho g Q h / (T \omega)$$

(Engan, 2018) (Formel 17)

Hvor

$\eta$  = Virkningsgrad

$\rho$  = Væskens massetetthet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ][gitt for vann:  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ]

$Q$  = Volumstrøm [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$h$  = Energihøyde [m]

$T$  = Kraftmoment [Nm]

$\omega$  = Vinkelhastighet [ $\text{s}^{-1}$ ]

Virkningsgraden er dermed en funksjon av kraftmomentet som virker på pumpens aksling med vinkelhastighet  $\omega$ . Ifølge Engan (2018) baseres pumpen på bruk av elektrisk energi for dannelsen av rotasjonsbevegelse av drivakselen i pumpehuset. Dette akselererer vannet som videre vil endre sitt trykk i henhold til Bernoullis prinsipp om konstant energi langs en strømningslinje. Dermed vil pumpens utforming, og pumpetype, avgjøre hvordan trykkehøyde tilføres systemet.

Statisk løftehøyde innebærer trykket som en funksjon av høyden. Dette må pumpen overvinne for å skape vannføring av vann til områder som ligger ved større kotehøyder. Det dynamiske trykket knyttes til friksjonstapene ved vannføring i ledningene, og skal også tas med i betraktning under valg av pumpe, samt innstilling av driftsbetingelser under kjøring av pumpe.

Hver pumpe får oppgitt en Net Positive Suction Head-verdi (NPSH) av produsent. NPSH-verdien betegner en nødvendig margin for trykket på pumpens sugeside (innløp), og damptrykk. NPSH-

---

verdien bestemmes av pumpens utforming og design, og må tas hensyn til for å unngå kavitasjon. Kavitasjon er dannelsen av gassbobler i væsken, og kan medføre stor skade på infrastruktur og materiell. (Helseth, 2020b; Maritim kompetanse, n.d.)

### 2.5.2 Affinitetslovene

Affinitetslovene beskriver sammenhengen mellom en pumpes turtall, vannføring, trykk og effektbehov. Sammenhengen kan beskrives med affinitetslovene.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

(Buttingsrud, 2019) (*Formel 18*)

Hvor

Q = Vannføring [m<sup>3</sup>/s]

P = Effektbehov [W]

H = Trykkbehov [m]

n = Turtall [dimensjonsløs]

Affinitetslovene viser at en halvering av turtall medfører en reduksjon av effektbehov til  $\frac{1}{8}$ .

### Sentrifugalpumpe

Sentrifugalpumpen er en av de mest hyppig brukte pumpetyper. Pumpen anvendes ofte innen prosessindustrien, så vel som innen vanddistribusjon. Sentrifugalpumpens virkemåte er knyttet til sentrifugalkreftene som oppstår når vannet strømmer fra innløpet, og inn i pumpens svinghjul (Engan, 2018; Ødegaard, 2014). Dette akselerer hjulet til en høy hastighet, og vannet slenges til sidene med høy kinetisk energi. I henhold til Bernoullis prinsipp vil trykket i vannet øke når hastigheten synker som følge av sammenstøt med veggene i pumpehuset. Pumpens løpehjul kan ha omdreiningshastigheter på 1450 – 2900 omdreininger per minutt.

## 2.6 Trykkreduksjonsventiler

Trykkreduksjonsventil er en sentral innretning for manuell og egendefinert styring av trykk nedstrøms ventilen. Trykkreduksjonsventilens funksjon er innstilling av nedstrøms trykk til et forhåndsdefinert og konstant nivå. For høye verdier av trykk kan medføre skader på materiell, og større risiko for lekkasje. Ved aktiv trykkstyring er derfor trykkreduksjonsventilen et viktig element, og vil være montert i områder som er sensitive for forhøyet trykk. Trykkreduksjonsventilen brukes også ved overgangen mellom forskjellige trykksoner. Dette er nødvendig, fordi topografiske forskjeller i terreng stiller krav til trykk: høyere geografisk beliggenhet vil, ved strømning til et lavere område, øke trykket grunnet tyngdekraftens betydning på trykket. Dette innebærer at en trykkreduksjonsventil kan være nødvendig ved strømning til områder i lavere terreng. (Bermad, 2020; Ødegaard, 2014)



Figur 8: Illustrasjon av innsiden til en Bermad-trykkreduksjonsventil. (Bermad, 2020)

To sentrale varianter av trykkreduksjonsventiler er gitt her:

- PRV (Pressure Reducing Valve) er tradisjonelle, mekaniske trykkreduksjonsventiler. Disse er svært vanlige i distribusjonsnett verden over. Ventilen kan justeres på stedet, og levere et konstant, forhåndsdefinert trykk på utløpssiden av ventilen. Det er også mulig
- RTC (Real Time Controlled) er ventiler som kan kontrolleres i sanntid. Disse ventilene er fjernstyrt, og kan justeres etter behov og tilstand i ledningsnettet. Driftsoperatøren kan kontinuerlig overvåke tilstander i nettet, og dermed gjøre nødvendige justeringer. Dette tillater større fleksibilitet.



---

## **2.7 Aktiv trykkstyring**

Aktiv trykkstyring er en metode for reduksjon av lekkasjeandel på drikkevannsnettet, samt optimalisering av trykknivåer. Målet med metoden er å redusere trykket på drikkevannsnettet til nødvendig driftstrykk for sikker leveranse av vann til forbrukere ved å benytte seg av trykkstyring gjennom en forbruksbasert modell. Dette skal sikre at tilstrekkelig vann leveres ved behov til abonnenter, og at trykket skal styres basert på behov. Et viktig element ved aktiv trykkstyring vil være å optimalisere trykket som oppstår nedstrøms ventilen, slik at trykket til enhver tid er i stand til å levere vann til abonnenter. Slik som det fremkommer tidligere i oppgaven finnes det en direkte sammenheng mellom trykk og lekkasjeandel: lekkasjeandel er proporsjonal med trykket. For reduksjon av lekkasjeandel er det derfor ønskelig at trykket i nettet ikke er unødvendig høyt.

Trykkreduksjonsventiler vil være av særlig viktig betydning, fordi disse ventilene vil holde trykket på et tilfredsstillende nivå. Trykkreduksjonsventiler har vært brukt til trykkkontroll i lang tid. Aktiv trykkstyring innebærer å aktivt styre trykket nedstrøms ventilen ved hjelp av kontinuerlige trykkmålinger og tilstandsanalyser som legger føringer for hvilken innstilling ventilen skal ha til enhver tid. Dette skjer ved bruk av sensorer, samt kommunikasjonssystemer som kommuniserer med driftssentralen. Utstyret kan enten justeres automatisk basert på forhåndsdefinerte styringsregler og bruk av algoritmer, eller ved bruk av mekaniske ventiler hvor man stiller inn sammenhengen mellom levert trykk og vannføring.

Pumpestyring er et annet verktøy for optimalisering av trykknivå. Pumper med variabelt turtall må være i stand til å regulere turtall for leveranse av gunstig trykk basert på forbruket. Prinsippet er likt som for bruk av trykkreduksjonsventiler, og innebærer utarbeidelse av styringskriterier for styring av pumpe, samt strategier for kontinuerlig kalibrering.

Hittil finnes det ikke mange erfaringer fra norsk VA-bransje med aktiv trykkstyring. Det er dog satt et stort fokus på lekkasjereduksjon, og det er tidligere gjennomført mange studier av lekkasjeandeler, samt tiltak for reduksjon av lekkasje. En særskilt viktig del av dette vil innebære pumper, og korrekt innstilling av disse.

### ***2.7.1 Pumpestyring***

En sentral metode for aktiv trykkstyring innebærer styring av pumper. Som nevnt i kapittel 2.5.1 er en pumpes funksjon å tilføre økt trykk ved vannføring. Dette medfører at pumpen er en meget viktig komponent i moderne vanddistribusjonsnett, da det ofte er behov for trykkøkning for økt løftehøyde i systemet. Sett i sammenheng med forholdet mellom trykk og lekkasjeandel, er det undersøkt hvilken effekt aktiv trykkstyring i form av pumpestyring har hatt ved praktiske forsøk.

---

## Rotodynamisk pumpe

Page et al. (2019) beskriver en case fra Sør-Afrika, der det ble redegjort for metode og effekt av rotodynamisk pumpe i et eksisterende vandndistribusjonsnett. Pumpetypen som ble betraktet er av typen som opererer med dynamisk hastighetskontroll, forkortet VSP (Variable Speed Pump). En rotodynamisk pumpe leverer tilfører økt høyde til systemet ved et roterende pumpehjul. Pumpehjulets turtall,  $\omega$  [RPM], kan justeres etter behov, i motsetning til tradisjonelle pumper med fast turtall (Page et al., 2019). Pumper kan justeres opp til 3 450 RPM. Basert på affinitetslovene vil en VSP bruke mindre energi ved lavere hastigheter (Aquatics International, 2017). Algoritmer brukes til å registrere trykkverdier innhentet ved bruk av sensorer i systemet. Slike algoritmer refereres til som *kontroller*. Optimal definering av styringsregler og

Kostnaden for VSP er høyere enn for konvensjonelle pumper, men vil kompenseres ved lavere energikostnader ved drift over tid. En annen viktig fordel ved bruk av VSP er optimalisering av trykknivå i systemet: tradisjonelle pumper kjører med fast turtall. I perioder med lavere forbruk, og dermed lavere krav til trykk i nettet, vil lekkasjeandeler og energiforbruk være høyere enn nødvendig.

### 2.7.2 Metoder og utstyr for trykkstyring

Metoder og utstyr for trykkstyring er mye undersøkt i litteraturen, og det er skrevet mange rapporter og studier på området. Et studium gjennomført av Moseithe et al. (2020) beskriver ulike metoder og teknologier som bidrar til aktiv trykkstyring. Studiet utforsket ulike erfaringer og metoder for trykkstyring som fantes i litteraturen. Trykkontrollelementene som er gitt under beskriver den mer konvensjonelle metoden ved statisk trykkstyring.

## Trykkontrollelementer

Tabell 4: Oversikt over ulike trykkontrollelementer. disse elementene inngår i konvensjonell trykkstyring. etter inspirasjon fra (Moseithe et al., 2020)

Elementer	Bruksområde
Trykkreduksjonsventiler (PRV)	Trykkregulerende ventil for leveranse av et spesifisert trykk nedstrøms fra ventilen.
Trykkoppretholdende ventil (PSV)	Ventil for opprettholdelse av spesifisert trykk nedstrøms fra ventilen.
Trykkkontrollventiler (PCV)	Ventiler for kontroll av trykk i et identifisert trykkkontroll-område.

Trykkbryterventil (PBV)	Ventiler for spesifisering og styring av et forhåndsdefinert trykkfall over ventilen.
Pumpeturbiner (PATs)	Pumper for gjenvinnelse av elektrisk energi. Vil også være sentral innen regulering av trykk når definerte verdier overskrides.

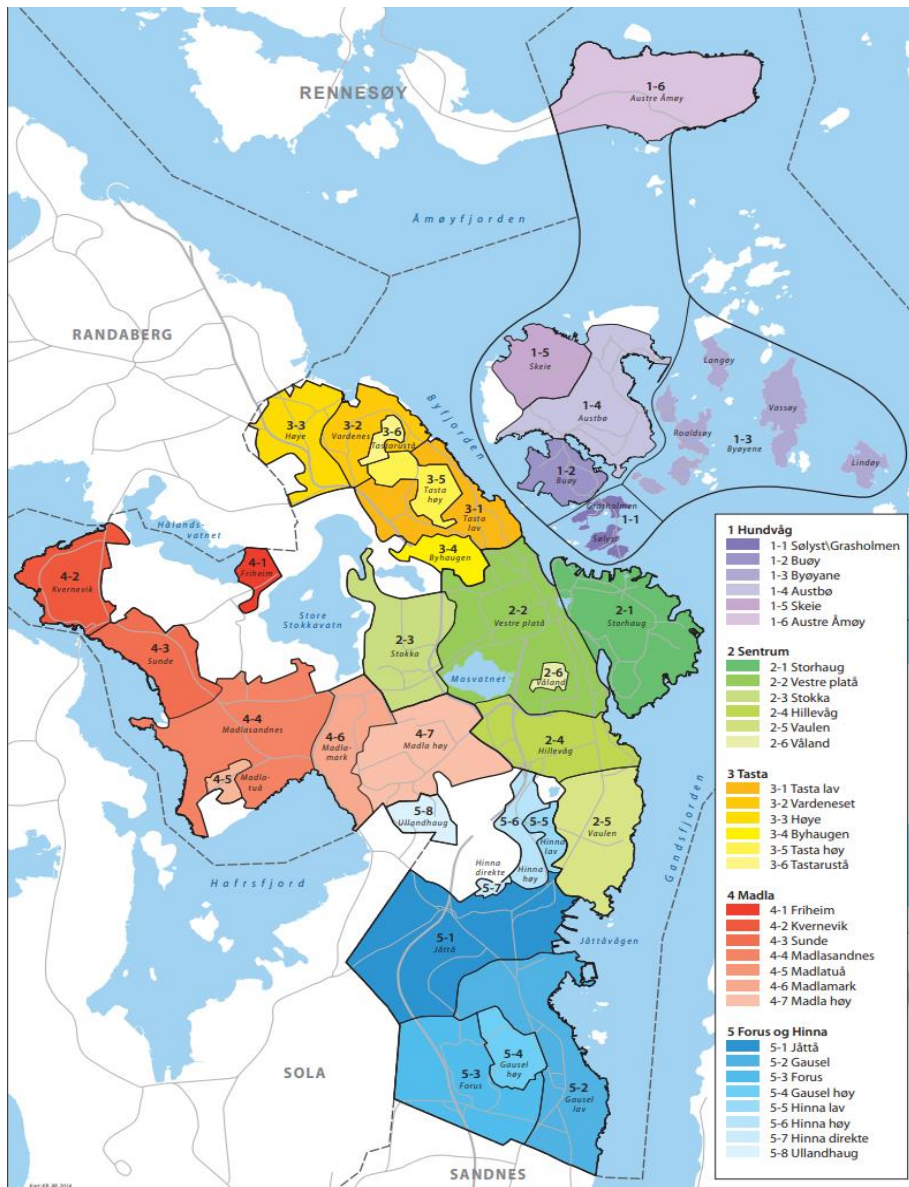
Tabell 4 viser en oversikt over ulike trykkontrollelementer for trykkstyring. Vanlig praksis innebærer at PRV har vært mest brukt innenfor trykkstyring, spesielt ved reduksjon i etterspørsel etter vann. I senere tid har det vært satt et fokus på gjenvinning av energi, hvilket medfører bruk av pumpeturbiner. Dette vil gi trykkstyring med en reduksjon i driftskostnader. Plasseringen av disse pumpeturbineene var minst like viktige som pumpestyring/kontroll med tanke på ytelse (Mosetlhe et al., 2020).

### ***2.7.3 Soneinndeling***

Et viktig virkemiddel innen tradisjonell trykkstyring er soneinndeling av distribusjonsnett. Dette gjøres primært for å kartlegge behov for trykk innen ulike soner innad i et distribusjonsnett. Metoden er mye brukt i norske kommuner, og har som hensikt å behandle større områder i et distribusjonsnett som individuelle soner med spesifikke behov for trykk, vannmengde og leveransesikkerhet. Nødvendig infrastruktur som trykkreduksjonsventiler, vannmålere og sensorer for måling av vannføring og trykk finnes i distribusjonsnett for kontinuerlig innhenting av data til driftsanlegg. Herfra kan innsendte data tolkes, og gi driftsoperatører en oversikt over parametere i distribusjonsnettverket som skal stilles inn for optimal drift av nettverket. (Stavanger kommune, 2014)

Et relevant eksempel på en soneinndeling er Stavanger kommunes inndeling, basert på dokument om lekkasjereduksjon i kommunen. Kommunen fokuserer på tilstrekkelig installasjon av målere, og tilfredsstillende samspill mellom driftsanlegg og distribusjonsnettverk. (Stavanger kommune, 2014)

Kommunen setter søkelys på kontinuerlig oppfølging av soner, og implementering av tiltak der det er nødvendig. Et fokus på nøye overvåking av tilstand i hver enkelt sone vil være et effektivt virkemiddel for lekkasjereduksjon. Kommunen påpeker videre at dersom tiltak for lekkasjereduksjon ikke har tilfredsstillende effekt med tanke på lekkasjereduksjon, vil det videre settes søkelys på rehabilitering og utskiftning av eksisterende ledningsnett og infrastruktur.



Figur 9: Illustrasjon av soneinndeling i stavanger kommune, med inndeling av soner innad i bysoner 1-5. (Stavanger kommune, 2014)

### 2.7.4 IT-teknologi

Moderne og tradisjonell teknologi tas i bruk ved aktiv trykkstyring. Teknologi som tas i bruk skal sørge for at systemer blir utformet korrekt, og bidra til optimalisert drift.

#### Dataprogrammer

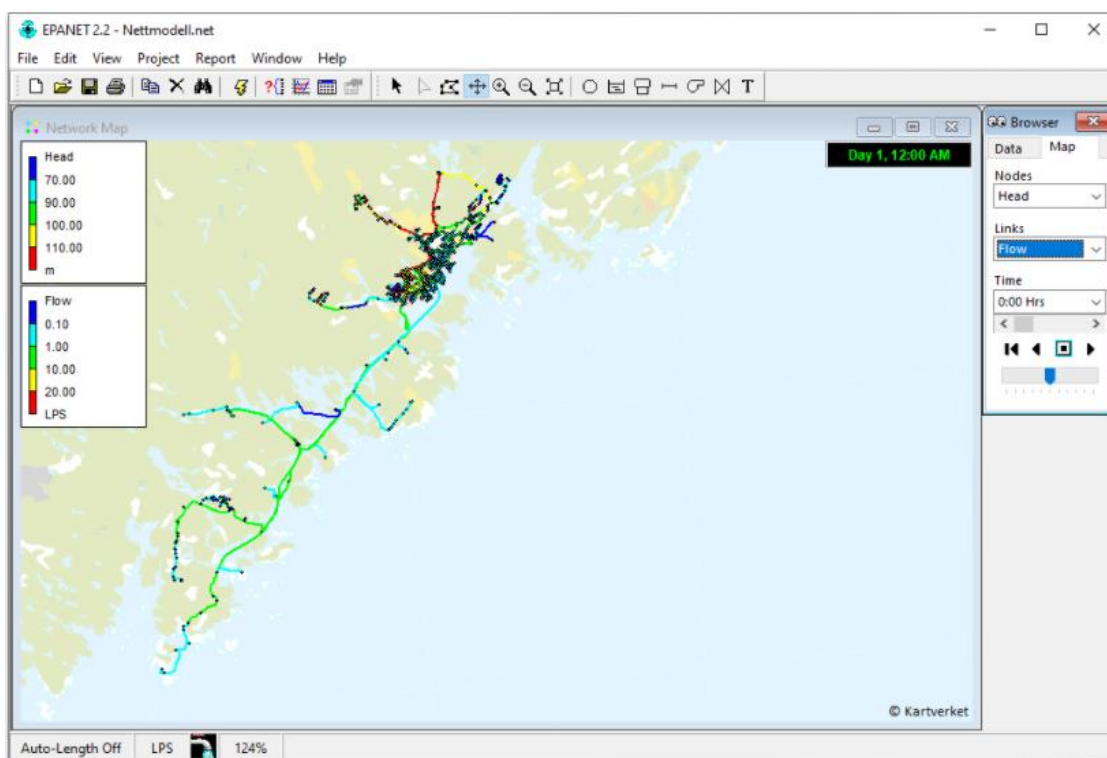
EPANET er et allment tilgjengelig, gratis program utviklet av United States Environmental Protection Agency (U.S.A EPA.). EPANET kan brukes til å gjennomføre hydrauliske beregninger, og utforming av modeller. Programmet baserer seg på at distribusjonssystemet er under trykk, og kan gjennomføre beregninger av kompliserte hydrauliske systemer slik et distribusjonsnett er. Blant programmets mange bruksområder, er design, prosjektering og driftsoptimalisering særlig relevant (EPANET.no, 2020).

#### Relevante bruksområder

- Beregning og estimering av trykk og trykkforhold i et ledningsnett
- Beregning av økt/reduert belastning på nettet
- Vurdere effekten av installert infrastruktur, for eksempel pumper, utjevningsbasseng, og ventiler
- Beregning og vurdering av brannvannsmengder, og dets innvirkning på systemet
- Vurdering av vannkvalitet, og hvordan dette påvirkes i systemet

(EPANET.no, 2020)

Programmet tillater simuleringer over en gitt tid, og tar forbruksmønster og variasjoner med i betraktningen. Se Figur 6 som viser et eksempel på en modell generert i EPANET.



Figur 10: Eksempel på modell utformet i EPANET. (EPANET.no, 2020)

---

### **3 Metode**

Denne oppgaven gjennomføres som en kvalitativ studie av litteratur for å belyse erfaringer knyttet til tematikken. Målet med oppgaven er å søke etter, gjengi, og beskrive ulike erfaringer knyttet til aktiv trykkstyring.

#### **3.1 Bakgrunnskapittel**

For å skaffe til veie litteratur og kilder til oppgaven vil det benyttes ulike typer oppslagsverk for å innhente informasjon. Til bakgrunnskapittelet blir det hovedsakelig benyttet lærebøker, og ulike nettsteder for innhenting av informasjon. Bakgrunnskapittelet skal belyse teorigrunnet for aktiv trykkstyring, og sammenfatte informasjonen på en så kort og konsis måte som mulig. Relevante kilder her er lærebøker innenfor fysikk og fluidmekanikk. Disse beskriver naturlovene som ligger til grunn for metoden. Lærebøker innenfor VA-teknikk beskriver andre elementer som ligger til grunn for lekkasje og aktiv trykkstyring.

#### **3.2 Spørreundersøkelser og kartlegging av tilstand i kommuner**

Siden det ikke finnes mye litteratur i forbindelse med aktiv trykkstyring i Norge, vil det være viktig å ta kontakt med norske kommuner for innhenting av informasjon knyttet til trykkstyring.

Ved kartlegging av erfaring med aktiv trykkstyring er det blitt sendt ut spørreskjema til fire norske kommuner som alle er medlemmer av VASK-nettverket. Spørreskjemaet fokuserer på dagens tilstand i kommunene med tanke på lekkasjeandeler, og økonomiske utfordringer knyttet til dette. Videre tar spørreundersøkelsen for seg hvorvidt aktiv trykkstyring er implementert i kommunen, og eventuelt hvilke tiltak som er iverksatt. Undersøkelsen forsøker også å kartlegge kostnader knyttet til aktiv trykkstyring. Undersøkelsen er delt inn i to deler: Del 1 tar for seg lekkasjeandeler, og kostnader dette innebærer hos de respektive kommunene. Del 2 tar for seg aktiv trykkstyring, hvorvidt noen tiltak er implementert, og hvilken effekt disse tiltakene har hatt på lekkasjereduksjon.

Spørreskjemaet skjer over UiOs løsning for digitale spørreskjema, [www.nettskjema.no](http://www.nettskjema.no). Norsk Vann viderefremidlet spørreskjemaet på vegne av undertegnede. Det ble opplyst om personvern, hvor det inngår at besvarelsene ble anonymisert. Kommunen personen(e) svarte på vegne av ble identifisert og oppgitt i undersøkelsen, men ingen personopplysninger blir gitt utover dette. Skjemaet var åpent for besvarelse uten manuell utsending til bestemte e-post-adresser. Dette skyldtes at det var enklere å distribuere undersøkelsen via Norsk Vann, sammenlignet med å skaffe adresser til kommuner manuelt, for deretter å distribuere undersøkelsen videre.

---

Spørreundersøkelsen ble sendt ut til Norsk Vann tirsdag 20. april 2021, og ble videre distribuert videre torsdag 22.04 2021. Svarfrist for undersøkelsen ble satt til tirsdag 27.04 2021. På dette tidspunktet hadde fire kommuner gitt svar på undersøkelsen.

Følgende spørsmål inngår i undersøkelsen:

#### Del 1

- Hvor mye estimeres nåværende lekkasjeandel i kommunen til?
- Kjenner kommunen til hvor store kostnader som er knyttet til produksjon og transport av vann som går til lekkasje?
- Kjenner kommunen til hvor store kostnader som er knyttet til diagnostisering, lokalisering og iverksetting av tiltak mot lekkasje i ledningsnettet?
- Forekommer det tilfeller der kommunen kjenner til ledningsstrekke med lekkasje, men lar være å utbedre lekkasjen fordi kostnaden ved utbedring ansees for å være for høy sammenliknet med besparelsen i lekkasjekostnader?

#### Del 2

- Hvilke forhåndsbestemte trykkgrenser benytter kommunen seg av i ulike soner?
- Har kommunen mange soner med store variasjoner i trykk fra sted til sted innen en og samme sone?
- Har kommunen mange soner der det er stor variasjon i trykk gjennom døgnet?
- Hvor utstrakt er pumping i kommunen?
- Hvor utstrakt er trykkreduksjon i kommunen?
- Benytter kommunen noen form for aktiv trykkstyring som et virkemiddel for å redusere lekkasjeomfanget i ledningsnettet?

Sistnevnte spørsmål må enten svares «Ja», eller «Nei». Svaret som avgis bestemmer hvilke spørsmål som følger videre.

Hvis det svares «Ja» på nevnt spørsmål, vil følgende spørsmål følge:

- Hvilke aktive trykkstyringstiltak benyttes og hvor lenge har de vært i drift?
- Hvilke styringsregler er valgt for tiltakene?
- Hvilken effekt har trykkstyringstiltakene hatt på lekkasjeomfanget?
- Hvordan har driftssikkerheten til trykkstyringstiltakene vært?
- Har investeringene vært verdt kostnaden?
- Er kommunen tilfreds med innføringen av aktiv trykkstyring?

Hvis det svares «nei» på nevnt spørsmål, vil følgende spørsmål følge:

- Har kommunen vært kjent med mulighetene for aktiv trykkstyring?

- 
- Har kommunen gjort en vurdering av potensialet ved aktiv trykkstyring for lekkasjereduksjon i kommunen?
  - Hva er bakgrunnen for at kommunen ikke har innført aktiv trykkstyring?
  - Tror kommunen det vil være aktuelt å innføre aktiv trykkstyring i kommunen i fremtiden?

### **3.3 Litteraturstudie**

Litteraturstudiet ble gjennomført ved undersøkelser av tre ulike caser om bruk av lekkasjereduksjon ved tradisjonelle trykkstyringsmetoder, sammenlignet med aktiv trykkstyring. Det siste studiet undersøkte i større grad kost-nytte ved iverksettelse av trykkstyringstiltak.

Casene ble funnet ved søk i Google Scholar. Ved søk i Google Scholar ble det funnet frem til relevante studier ved å benytte seg av begrepet «Active pressure control in water distribution networks». Tre studier ble valgt ut som grunnlag for litteraturstudiet, og ble gjengitt i hvert sitt delkapittel i kapittel 5: Litteraturstudie.

Hver rapport ble oversatt fra engelsk, ettersom rapportene er basert på forsøk gjort i internasjonal sammenheng. Rapportene ble gjengitt ved norsk oversettelse, men ikke nødvendigvis i sine helheter. Dette skyldtes at en del av rapportene ble betraktet som mindre relevante for besvarelse av problemstillingen, og ville tatt opp unødvendig mye plass i dette studiet.



---

## 4 Aktiv trykkstyring i Norge

Heretter vil studiet beskrive erfaringer gjort med aktiv trykkstyring i både nasjonal og internasjonal sammenheng. Det er blitt gjennomført en undersøkelse i fire av Norges største kommuner. Disse kommunene tilhører VASK-nettverket, et nettverk av Norges største kommuner i forhold til kommunal VA-drift. Disse fire kommunene er Drammen, Oslo, Bergen og Trondheim. Spørreundersøkelsen hadde som formål å kartlegge lekkasjeandeler og implementering av tiltak for lekkasjereduksjon, og aktiv trykkstyring.

### 4.1 Oslo kommune

#### Lekkasjeandel og kostnader

Kommunens lekkasjeandel estimeres til omtrent 30 %. Det utredes per tiden hvor store kostnader som knyttes til transport og produksjon av vann som forsvinner ut av systemet gjennom lekkasje i distribusjonssystemet. Kommunen undersøker også kostnader knyttet til diagnostisering, lokalisering og implementering av tiltak mot lekkasje, men har per april 2021 ikke et godt estimat på dette. Kommunen oppgir at de ikke lar lekkasje stå og lekke dersom dette er oppdaget. Dette gjelder uavhengig av det innebærer kostnadsbesparelser ved å velge bort utbedring av lekkasjen.

#### Aktiv trykkstyring i kommunen

Oslo kommunes forhåndsbestemte trykkgrense krevet at kommunen leverer et trykk på minimum 2 bar (tilsvarer ca. 20,4 mVs). Kommunen oppgir at de har tilstrekkelig trykk til å sørge for tilfredsstillende vannforsyning til øverste etasje i alle bygninger innenfor de ulike sonene. Det oppgis også at kommunen består av mange ulike trykksoner. Kommunen har store trykkvariasjoner innad i hver enkelt sone, men at sonenes trykkvariasjoner følger ordinært forbruksmønster og døgnvariasjon.

Oslo kommune oppgir at de for tiden benytter seg av to pilotprosjekter som inngår i aktiv trykkstyring:

- Bruk av dynamisk trykkreduksjonsventil (mengdestyring)
- Bruk av dynamisk trykkstyring av pumper (tidsstyrt)

Begge disse tiltakene er per tiden pilotprosjekter, hvor kommunen ønsker å analysere effekten av tiltakene.

Kommunen oppgir at de har opplevd noen utfordringer knyttet til driftssikkerheten ved bruk av dynamiske trykkreduksjonsventiler. Samtidig har bruk av dynamisk trykkstyring av pumper ikke medført negative momenter ved driftssikkerhet.

---

## **Investeringskostnader**

Kommunen oppgir at de har tilstrekkelig med midler til å satse på nye, tunge investeringer i smarte og effektive løsninger. Det kan derfor forventes at man kan se initiativ som aktiv trykkstyring og liknende løsninger i fremtiden.

### **4.2 Trondheim kommune**

Trondheim kommune er en av Norges tre største byer, og er derfor avhengig av et velutviklet og velfungerende vanddistribusjonssystem.

#### **Lekkasje og kostnader**

Per april 2021 estimeres lekkasjeandelen i kommunen 26 %. Vanntapet estimeres til 6.647.790 m<sup>3</sup>/år, og tilsvarer 211 l/s. Kommunens arbeid for lokalisering, diagnostisering og iverksettelse av tiltak mot lekkasje i ledningsnett er todelt: på den ene siden har kommunen øremerket 8 millioner kroner i årlig budsjett for 4 årsverk, samt faste kostnader som inkluderer blant annet strøm, samt vedlikehold av infrastruktur som vannmålere og annet utstyr. På den annen side fokuseres det på utskiftning av ledninger som er kraftig rammet av lekkasje, noe som medfører en fornyelse av det kommunale ledningsnett på ca. 3 km per år.

Ved brudd på ledninger følger kommunen et prinsipp om at ledningen skal repareres så hurtig som mulig. Ved alvorlige brudd, eller andre hendelser som kan få store konsekvenser på infrastruktur og natur, stenger kommunen av den aktuelle ledningen, og kobler om for å motta vannforsyninger fra alternative traseer. Det er ikke aktuelt for kommunen å la en ledning lekke kontinuerlig.

#### **Aktiv trykkstyring**

Ved spørsmål om hvilke forhåndsbestemte trykkgrenser kommunen benytter seg av i ulike soner, svarer kommunen følgende:

Vannspeil: 70-90-115-135-145-150-180-193-204-224-227-230-257-260

Dette tolkes dithen at kommunen at kommunen består av 14 ulike trykksoner med trykkgrenser som nevnt over.

Kommunen oppgir at de opplever store trykkvariasjoner innenfor hver enkelt sone, fordi det er store høydeforskjeller innad i sonene. Dette kan skape utfordringer for kommunen.

Kommunen oppgir at de ikke opplever store utfordringer knyttet til variasjoner i trykk gjennom døgnet, og at de opplever ledningsnett som stabilt og robust.

---

Kommunen oppgir videre at vannkilden som forsyner kommunen ligger 150 moh, og at vannforbruk i høyder over dette krever pumping, enten i en eller flere omganger. I det kommunale distribusjonssystemet benyttes det ca. 120 trykkreduksjonsventiler.

Kommunen oppgir at de bruker aktiv trykkstyring for reduksjon av lekkasjeandeler. Dette skjer gjennom trykkreduksjon ved nattestid ved bruk av Bermad reduksjonsventiler. Ved en liten åpning i ventilen, vil ventilen automatisk nedjusteres til et lavere «set-punkt».

Styringsregler for tiltak innebærer at ved lav vannføring senkes trykket. Kommunen oppgir at det er vanskelig å måle effekten av styringstiltak:

- Det er vanskelig å justere korrekt ettersom nattforbruket varierer i de sonene dette er utprøvd.
- I en aktuell sone er trykket fra vannspeil redusert fra 224 til 193. Ca. 2500 pe (personequivallenter)
- I en annen reduseres trykket fra vannspeil fra 90 til 70. Også her 2500 pe.

Kommunen oppgir at det er vanskelig å beskrive effekten, ettersom dette er et relativt nytt prosjekt uten at klare resultater foreligger. Tiltakene blir beskrevet som trygge, da ingen abonnenter risikere å miste tilgang til vann. Kommunen oppgir at de ønsker å nå et mål på 20 % lekkasjeandel, og at de derfor er positive til innføring av aktiv trykkstyring.

### **Investeringskostnader**

Kommunen oppgir at de forventer positive resultater med tanke på kostnadsbesparelser, men at klare resultater ikke foreligger enda.

---

### 4.3 Drammen kommune

#### Lekkasjeandel og kostnader

Drammen kommuner oppgir at lekkasjeandelen estimeres til 38 %. Det oppgis videre at transport og forsyning av vann i drikkevannsnettet hovedsakelig baseres på selvføll. Kommunen har et budsjett for lokalisering, diagnostisering og implementering av tiltak for lekkasjereduksjon på 2,4 millioner kroner i 2021. Samtidig opplyses det at det ikke forekommer tilfeller der kommunen lar være å utbedre kjente lekkasjer på ledningsnettet. Dette gjelder selv om besparelsen på iverksetting av tiltak er for lav i forhold til kostnader knyttet til lekkasje.

#### Aktiv trykkstyring

Kommunen oppgir at forhåndsbestemte trykkgrensener pålegger kommunen å levere vann til abonnentene med trykk på mellom 2 - 15 bar (tilsvarende 20,40 mVs – 152,9 mVs). Vanligvis ligger trykket på 6 – 7 bar (61,2 mVs – 71,4 mVs).

Kommunen oppgir videre at det eksisterer store variasjoner innad i hver enkelt trykksone, med variasjoner på 2 – 10 bar innen en og samme sone. Dette skyldes høydeforskjeller knyttet til bebyggelse i kommunen. Kommunen benytter seg av mer enn 40 trykkreduksjonskummer, og tar i bruk pumper i svært liten grad.

Kommunen oppgir videre at de er lite kjent med aktiv trykkstyring, og at de derfor ikke har tatt i bruk tiltak som inngår i denne kategorien utover det som er nevnt. På den annen side opplyser de at de kan være interessert i å ta i bruk i aktiv trykkstyring i fremtiden, avhengig av hvilke fordeler dette innebærer, og hvorvidt dette kan bidra til å lokalisere og redusere lekkasje.

---

## 4.4 Bergen kommune

### Lekkasjeandel og kostnader

Bergen kommune oppgir at de har en innrapportert lekkasjeandel på ca. 36 %. Videre oppgir kommunen at vannproduksjon er på totalt 31 714 000 m<sup>3</sup>, mens vanntapet i rapporteringsår var er på 11 520 000 m<sup>3</sup>. Energiforbruk knyttet til vannproduksjon per år oppgis å være 7840 MWt, samtidig som energiforbruk knyttet til distribusjon per år oppgis til 4336 MWt.

Kostnadsposter knyttet til lokalisering, diagnostisering og iverksettelse av tiltak oppgis av kommunen i følgende kategorier:

- Indirekte kostnader knyttet til vanddistribusjon: 19 kr/pers. tilknyttet
- Kjøp av tjenester knyttet til egenproduksjon i kommunen (konsulenttjenester, drift/vedlikehold): 537 kr/pers. tilkn.
- Driftskostnader knyttet til fornyelse av ledningsnett: 581 kr/pers. tilkn.
- Kjøp av drift fra egne kommunale foretak, eller AS: 378 kr/pers. tilkn.
- Personalkostnader: 141 kr/pers. tilkn.

Sum driftskostnader: 1135 kr/pers. tilkn.

Ved vannforsyning er selvkost for dagens standard på tjenesten 1250 kr/pers. tilknyttet.

Driftskostnader ved vanddistribusjon til abonnentene fratrukket driftsfinansiert ledningsfornyelse: 554kr\pers.tilkn.

Kommunen oppgir at de utbedrer alle kjente ledningsbrudd og lekkasjehendelser på tross av en mulig kostnadsbesparelse knyttet til å ikke iverksette tiltak.

### Aktiv trykkstyring

Vanddistribusjonssystemet i Bergen kommune er fordelt på 6 trykksoner:

- Sone 1: 60 - 80 mVs
- Sone 2: 90-125 mVs
- Sone 3: 135-175 mVs
- Sone 4: 180-220 mVs
- Sone 5: 225-240 mVs
- Sone 6: 260-290 mVs

I henhold til gjeldende reglement i Bergen kommune skal trykket ligge på mellom 2,5 – 6 bar. Kommunen oppgir videre at de iverksetter tiltak for trykkøkning- eller reduksjon for å sørge for tilfredsstillende drift i henhold til dette kravet ved hjelp av eventuelle trykkøkingsstasjoner, eller reduksjonsventiler.

---

Kommunen oppgir at de forsøker å ikke la trykket overstige nødvendig driftstrykk, for å redusere lekkasjeandel. Dette skjer blant annet gjennom nattsenking av trykk, samt en mer effektiv soneinndeling. Soneinndeling skal bidra til en lokalisert, og mer effektiv drift av eksempelvis lokale trykkøkingsstasjoner i terreng lokalisert i høyden.

For lekkasjekontroll er Bergen inndelt i 65 lekkasjekontrollsoner, eller storsoner. Disse består av totalt ca. 100 vannmålere som bidrar til å kartlegge lokale tilstander på ledningsnettet. Kommunen oppgir videre at storsonemålere har vært i bruk siden 2008, og at dette har vært en viktig del av implementering av tiltak for vellykket lekkasjereduksjon. Kommunen oppgir at de vil fortsette dette arbeidet, ved å installere flere vannmålere, samt fortsette nattsenking av trykk. Samtidig betrakter kommunen det som et viktig element å lokalisere og iverksette tiltak mot lekkasje så raskt som mulig.

Kommunen oppgir videre at de ikke har erfart særlig store trykkvariasjoner innen en og samme sone. Kommunen opplever ikke store variasjoner i trykk gjennom døgnet som følge av varierende forbruksmønster hos abonnenter. Kommunen har ca. 90 trykkøkingsstasjoner, og ca. 130 trykkreduksjonsanlegg. Dette henger sammen med at ledningsnettet har høyt trykk.

Kommunens tiltak for aktiv trykkstyring omfatter blant annet:

- Trykkregulering ved pumpestasjoner (vannmengde som styringsparameter)
- Timesbasert trykkstyring, med måling og kalibrering basert på data målt og innhentet på timebasis
- Konstant utgangstrykk
- Trykkregulering i forhold til kritiske punkter i ledningsnettet

Resultatene viser en reduksjon i bruddfrekvens og skader på ledningsnettet. Samtidig har kommunen registrert en reduksjon i lekkasjefrekvens. Driftssikkerheten har blitt nøye kontrollert og styrt gjennom driftskontrollørens strenge rutiner for driftssikkerhet.

### **Investeringskostnader**

Kommunen er generelt tilfreds med investeringen i tiltak for aktiv trykkstyring.

---

## 5 Litteraturstudie

Kapittel 5 betegner litteraturstudie-delen av studiet som er en gjengivelse av tre forskjellige rapporter. Rapportene beskriver hver sin case. Disse erfaringene presenteres her for å skaffe en oppdatert oversikt over hvilke erfaringer man har gjort seg med aktiv trykkstyring, og hvilke resultater disse prosjektene har gitt med tanke på lekkasjereduksjon.

### *5.1 Case: Aktiv trykkstyring for lekkasjereduksjon i Sør-Italia*

#### *5.1.1 Casebeskrivelse*

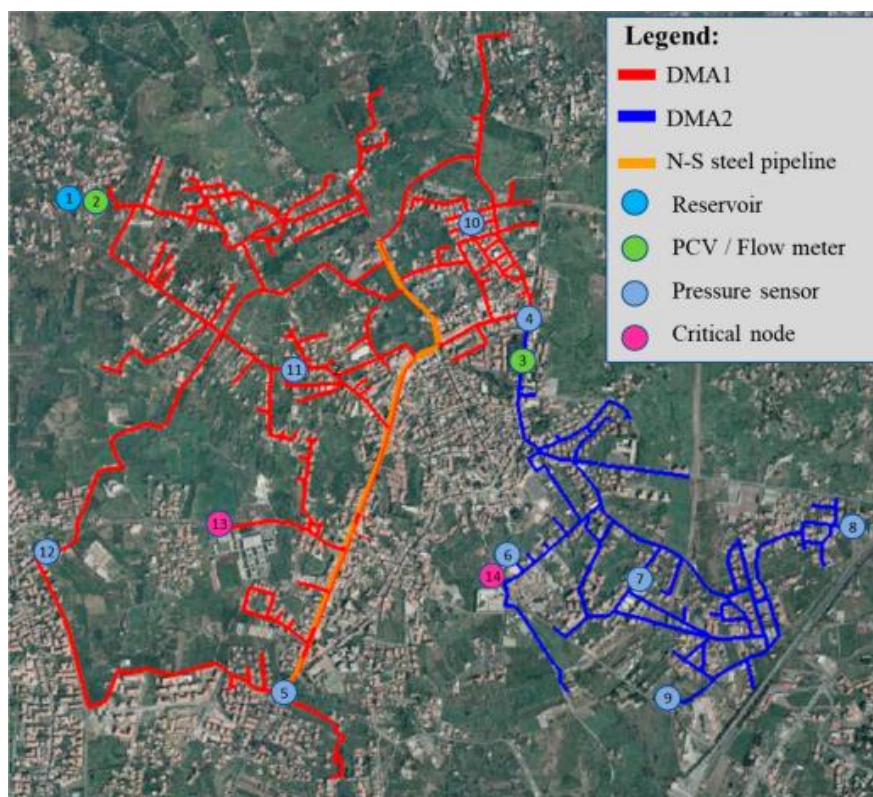
I 2020 ble det gjennomført et prosjekt ved Universitetet i Catania for å undersøke effektiviteten ved implementering av aktiv trykkstyring i forbindelse med måling av lekkasjereduksjon. Formålet med studiet var å kartlegge ulike metoder for trykkstyring, og dermed lekkasjereduksjon i ledningsnett. Studiet ble gjennomført ved å først kartlegge forbruk og forbruksvariasjoner i området som ble analysert. Deretter ble ulike scenarioer for implementering av tiltak for trykkstyring simulert og analysert i nettverket, nærmere bestemt trykkreduksjon i perioder av døgnet med lavt forbruk og lavt vannforbruk. Scenarioene ble gjennomført som forsøk i systemet, og deretter gjennomført som praktiske forsøk over Casen er basert på (Bosco et al., 2020) hvor det ble gjennomført en studie for Universitetet i Catania.

#### *5.1.2 Metoder ved casestudiet*

Studiet tar for seg et område i Sør-Italia. Systemet forsyner 2400 husstander (ca. 6100 forbrukere) med vann. Ledningsnett som ble analysert består av 39 km med ledninger, hvor vannet som transporteres til forbrukerne hentes fra reservoaret «Alto» lokalisert nord for byen i høyden 422 moh. Reservoaret har en kapasitet på ca. 100 m<sup>3</sup>.

To ulike målesoner for vannmengde i ringsystemet ble definert. Sonene omtales som DMA1 og DMA2 (District metered area 1 og district metered area 2), henholdsvis sone 1 og 2. Det ble installert trykkmålere i begge soner, totalt 5 i hver sone. Sonene er illustrert i Figur 11 som viser hele ledningsnett eksperimentet ble utført i. Figuren viser at begge sonene består av en kontrollventil i begynnelsen av sonens ledningsnett som definerer det forhåndsbestemte trykket i sonen. Videre ble forbruksvariasjoner gjennom døgnet identifisert.

En 2-km lang hovedledning som går fra nord til sør i referanseområdet håndterer en stor kapasitet, og har indre diameter DN200. Hovedledningen er av støpejern og stål. I Figur 5 markeres hovedledningen i oransje.



Figur 11: Illustrasjon av to trykksoner DMA1 og DMA2 henholdsvis i rødt og blått, samt hovedledning fra nord til sør i oransje. illustrasjonen viser reservoaret som lyseblått punkt, samt 2 kontrollventiler i grønne punkter. trykksensorer markeres ved mørkeblå punkter. to kritiske noder markeres i punkt 13 og 14. (Bosco et al., 2020)

Det ble definert tre ulike scenarier for implementering av tiltak for reduksjon av lekkasjeandel, samt et nullscenario hvor man benyttet dagens system uten modifiseringer.

### Scenarier (S0)

Nullscenarioet beskriver dagens tilstand uten ytterligere implementering av tiltak.

### Scenario 1 (S1)

Inkluderer rehabilitering av nord-sørgående hovedledning for å redusere lekkasjer oppdaget og lokalisert ved tidligere gjennomført undersøkelse av ledningen. Nord-sørgående hovedledning er av stål. Formålet med dette scenariet var å sørge for at hovedledningen hadde minimalt med skader, slik at fremtidig distribusjon gjennom denne ledningen skulle skje på en mer driftssikker måte, med minimal lekkasjeandel.



---

## **Scenario 2 (S2)**

Inkluderer tiltak fra scenario 1. I tillegg inkluderte scenario 2 et tillegg i form av tiltak for implementering av aktiv trykkstyring. To kontrollventiler for manuell håndtering av trykk i hver av de to respektive sonene ble installert i begynnelsen av hver sone, vist i Figur 1. Ventilene antas i simuleringen til å være tradisjonelle skru-ventiler, og monteres ved innløpet i hver av de to sonene. Målet i dette scenarioet er å redusere trykket i hver av de to sonene tilstrekkelig til å oppnå en lekkasjereduksjon, og samtidig opprettholde tilstrekkelig trykk til å kunne levere tilstrekkelig vann etter behov.

To kritiske noder ble identifisert, se punkt 13 (sone 1) og punkt 14 (sone 2) i Figur 11. Disse nodene betegnet nodene i distribusjonsnett med lavest målt trykk i løpet av en 24-timers simulering. Trykkreduksjonsventilene ble nedjustert til henholdsvis 7,5 m og 33 m i sone 1 og 2.

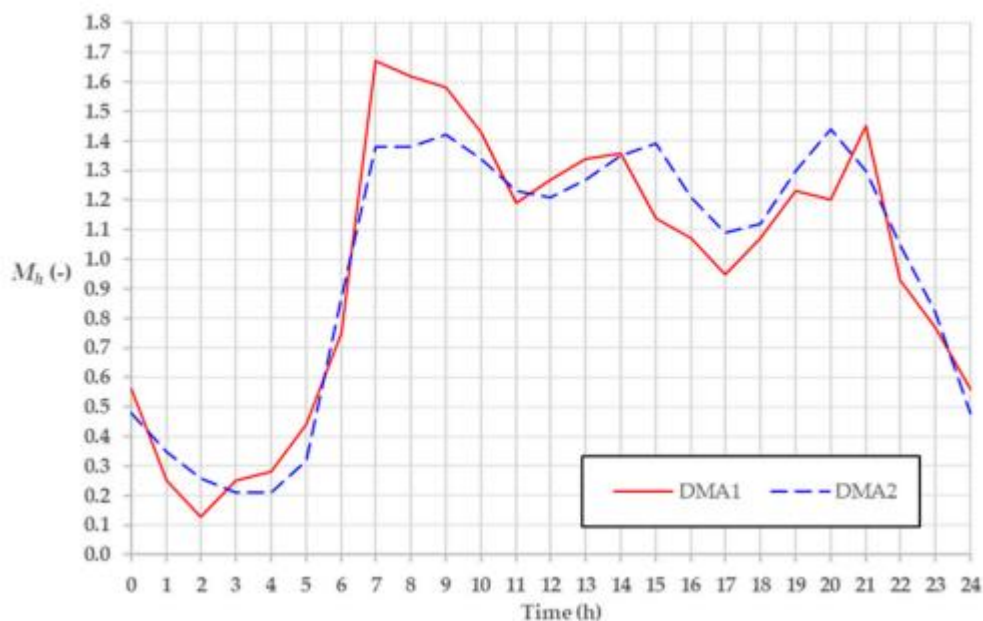
## **Scenario 3 (S3)**

Scenario 3 beskriver bruk av en fjernstyrt trykkkontrollventil i sanntid (RTC: Real-time pressure control). To ventiler (DN300 i sone 1, DN80 for sone 2) antas installert ved punktene for kontrollventiler i Scenario 2. Disse ventilene tillater styring av trykkreduksjonsventiler i sanntid, og kan tilpasses døgnetts etterspørsler og kriterier til leveranse. I studiet blir det oppgitt at tidligere erfaringer med RTC har gitt gode resultater, forankret i fleksibiliteten dette utstyret tilbyr.

S3 antar at trykket ved kritiske noder i både DMA1 og DMA2 skal stilles inn til 30 m. Samtidig skal ventilene overvåkes og kontrolleres i sanntid for eventuelle justeringer av nedstrøms trykk.

### ***5.1.3 Resultater***

En analyse for å kartlegge vannforbruk ved ulike tidspunkt i døgnet ble gjennomført i begynnelsen av simuleringen. Analysen viste et forbruksmønster i overensstemmelse et typisk forbruksmønster på mer generell basis. Analysen ble gjennomført for å kartlegge ulik etterspørsel gjennom døgnet, og dermed tilhørende behov for trykkstyring.



Figur 12: Resultater fra kalibrering. Figuren viser optimale timefaktorer for begge soner.

En gjennomsnittlig vannføring inn i distribusjonsnettverket ble målt til 56,5 L/s, og ble målt med node 2 som referansepunkt. I DMA1 og DMA2 ble det målt en gjennomsnittlig vannføring inn i de respektive sonene på 44,7 L/s og 11,8 L/s.

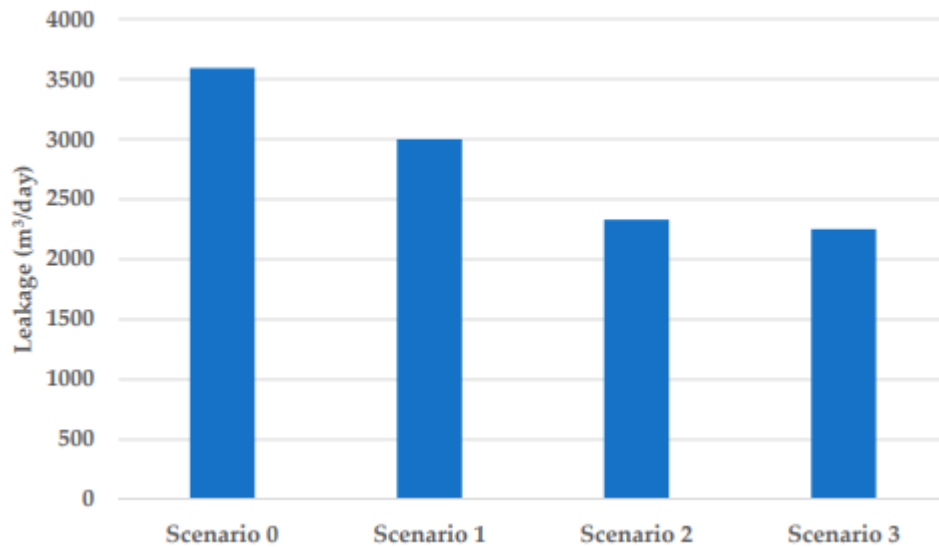
Fakturert vannforbruk, basert på informasjon innhentet fra ulike husstander, anslo det totale gjennomsnittlige vannforbruket i hele distribusjonssystemet til 14,9 L/s. Dette fordeler seg henholdsvis mellom DMA1 og DMA2 på 9,9 L/s og 5,0 L/s. Dette viser en tydelig proporsjonalitet mellom innbyggertallet i de to sonene, hvor 2/3 av innbyggerne er bosatt i DMA1.

Ved kjøring av simuleringer for de fire scenarioene ble det funnet at lekkasjereduksjon økte med antall tiltak iverksatt. Simuleringene ble kjørt og analysert, og den tidligere analysen av forbruksmønster ble brukt som referanse for evaluering av scenarioenes effektivitet. Før testing av de scenario 1-3 ble daglig lekkasjeandel målt til 3600 m<sup>3</sup>/dag i hele distribusjonsnettverket.

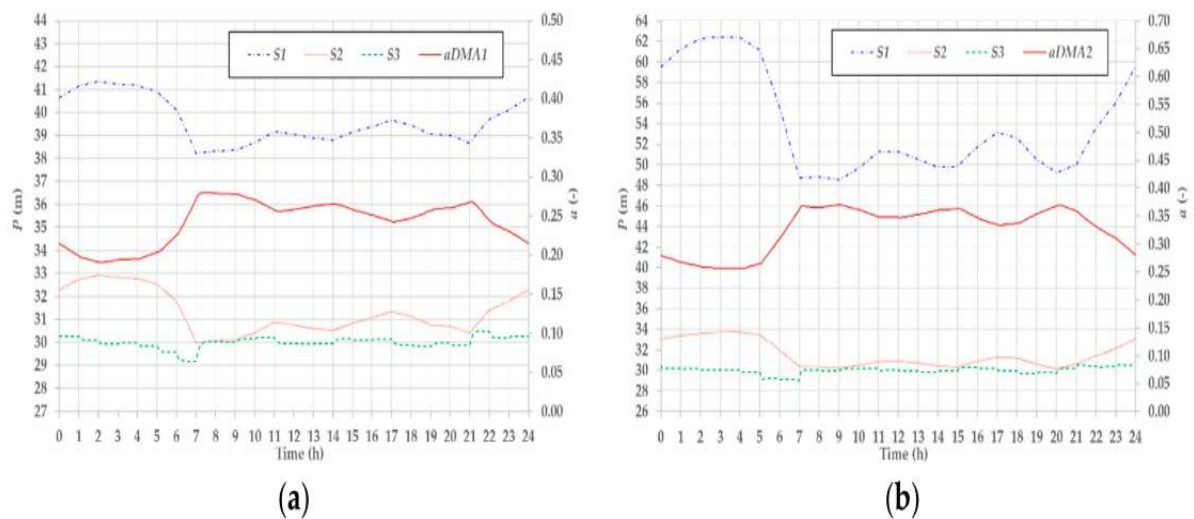
Ved S1 ble det registrert en reduksjon fra 3600 m<sup>3</sup>/dag til 3000 m<sup>3</sup>/dag. Nye lekkasjeandeler i DMA1 og DMA2 ble registrert til henholdsvis 2082 m<sup>3</sup>/s og 918 m<sup>3</sup>/s. Dette scenarioet innebar å rehabilitere områder langs hovedledningen som stod for lekkasjen, for eksempel områder med brudd og sprekker.

Ved implementering av S2 ble det registrert ytterligere lekkasjereduksjon. Ved gjennomføring av S2 ble nytt lekkasjevolum registrert til 2330 m<sup>3</sup>/dag (1726 m<sup>3</sup>/dag for DMA1 og 604 m<sup>3</sup>/dag for DMA2). Dette tilsvarer en reduksjon i lekkasjeandel på 35 % sammenlignet med S0.

Ved S3 viste analysen ytterligere lekkasjereduksjon. I kombinasjon med S1 og S2 reduserte S3 lekkasjeandelen til 2252 m<sup>3</sup>/s, noe som tilsvarer 37,5 % reduksjon sammenlignet med S0.



Figur 13: Lekkasjeandeler ved ulike scenarier



Figur 14: Trykknivåer ved kritiske noder i DMA1 (a), og DMA2 (b), sammenlignet med trykknivåer ved S1, S2, og S3. Rød graf betegner trykk som følge av åpning/lukking av ventil.

Rød graf i Figur 14 viser at åpning/lukking av ventilen gir et trykknivå konsistent med forbruksmønster skissert ved Figur 12. Ved nattetid sørget algoritmene for en lukking i stor nok grad til å redusere trykket ved lavt forbruk. Motsatt tilfelle fant sted på morgen- og dagtid, da forbruk var høyere.

## 5.2 Case: Aktiv trykkstyring, Poznań, Polen

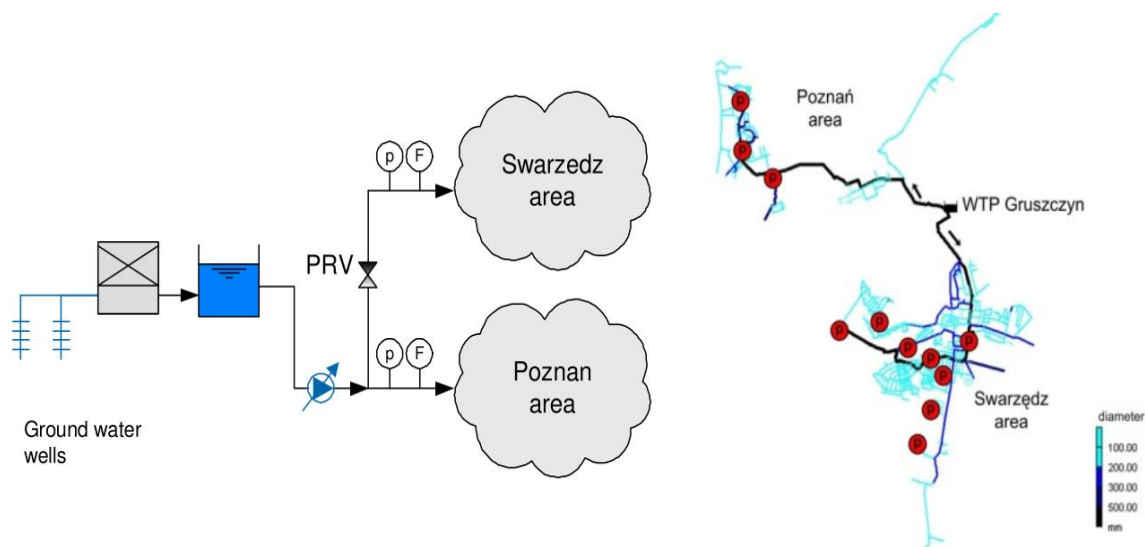
### 5.2.1 Casebeskrivelse

Representanter fra universiteter i Nederland, og selskapet Aquanet S.A. i Polen gjennomførte et prosjekt med aktiv trykkstyring i Poznan, som ligger lokalisert i vest-Polen. Selskapet Aquanet S.A stod ansvarlig for vannforsyningen til byens 550 000 innbyggere, og tilførte abonnentene drikkevann fra vannbehandlingsanlegget Gruszczyń. Formålet med prosjektet var å redusere lekkasjeandeler hjelp av en mer optimalisert trykkstyring. Samtidig ble det undersøkt hvilken effekt aktiv trykkstyring hadde på energiforbruket til pumper, og hvorvidt aktiv trykkstyring kunne bidra til reduksjon av dette.

Vannbehandlingsanlegget og tilhørende pumper og pumpesystemer ble håndtert manuelt frem til 2011, da det ble gjennomført en automatisering av infrastrukturen. Denne prosessen førte til at systemet kunne kjøres ubemannet. Case-studiet er basert på rapport av (Bakker et al., 2013)

### 5.2.2 Metoder ved casestudiet

Aquanet håndterte vannbehandlingsanlegget Gruszczyń som forsyner to områder, Poznań og Swarzędz.



Figur 15: Skisse som viser distribusjonsnettets fra kilden og inn til de to forsyningsområdene. Skissen viser også pumper og ventiler. Skissen til høyre viser distribusjonsnettets trykkmålere markert som røde punkter, hvorav ni nye punkter og to eksisterende punkter. Hentet fra (Bakker et al., 2013)

Som tidligere nevnt, ble systemet driftet manuelt av operatører, før en automatisering ble satt i gang i 2011. Vannbehandlingsanlegget Gruszczyń ble valgt ut for å teste denne automatiseringen som innebar ubemannet drift. Bakker et al. (2013) undersøkte hvilken effekt aktiv trykkstyring og automatisering ville ha for reduksjon av lekkasjeandel, samt reduksjon av energikostnader.

---

Implementering av automatisert aktivt trykkstyringstiltak ble forventet å medføre en optimalisering for systemet i form av fordelene nevnt over.

### Trykkstyring

Slik det kommer frem av Figur 15 ble vannføringen styrt i to retninger fra vannbehandlingsanlegget. En trykkstyringsventil som fra før var installert i systemet skilte de to forsyningsområdene. Ventilen skulle gjøre det mulig å holde et høyere trykk i et område, og redusere trykket i det andre området. Vannføringen til de to sonene ble styrt av fem identiske pumper med mulighet for dynamisk hastighetskontroll (VSD – Variable Speed Drive).

Operatørene valgte opprinnelig å innstille systemet for høyt trykk i pumpestasjonene. Dette skyldtes mangelfull informasjon om systemets trykkverdier ved ulike situasjoner og ved variasjoner i vannføring. Det ble besluttet å installere ytterligere ni trykkmålingspunkter som skulle skaffe til veie bedre informasjon om systemets trykk gjennom døgnet, og ved ulike vannføringer. Målingspunkter for trykk er skissert i Figur 15.

Informasjonen disse målingene ga, viste at det ikke var behov for å separere de to sonene ved bruk av trykkreduksjonsventilen. Ventilen ble fjernet, noe som resulterte i mindre differanse for trykk i de to sonene, som ga et mer balansert system. En dynamisk modul for trykkontroll (forkortet DPCM: Dynamic Pressure Control Module) ble installert for å frembringe styringsparametere ved vannpumpestasjonene. Tidligere var settpunkter statiske verdier satt av operatørene, noe som resulterte i mindre aktiv trykkstyring, og dermed lavere grad av optimalisering av systemet. Dette til forskjell fra DPCM som bestemte settpunkt basert på informasjon fra punkter for trykkmåling. DPCM genererte settpunkt basert på trykkmålinger fra alle målepunkter, som ble sammenlignet med nedre grenseverdi for hvert målepunkt.

DPCM baserte settpunktet på den bestemte målingen i systemet med lavest trykkmåling sett i forhold til nedre grenseverdi. Dette punktet ble deretter valgt som styringspunkt. DPCM endret settpunkt ved å betrakte følgende kriterier for bestemmelse av økning, eller senkning, av trykkpunkt:

- Dersom  $p_{mp, master} < p_{lower, master}$  skal DPCM øke settpunktets verdi
- Dersom  $p_{mp, master} > p_{lower, master}$  skal DPCM redusere settpunktets verdi

Her betegner  $P_{mp, master}$  [kPa] målt trykk i styringspunkt, og  $P_{lower, master}$  [kPa] betegner nedre grenseverdi for styringspunkt. DPCM brukte en PID-kontrollmekanisme (proportional-integral-derivative) for bestemmelse av settpunkt for trykk ved pumpestasjonen. Settpunktet ble bestemt basert på ønsket nedre grenseverdi, samt målt verdi for trykk ved styringspunktet blant punkter for trykkmåling.

---

## Bruk av offline-målepunkter for trykk

De ni nylig installerte målepunktene for trykk ble utstyrt med en lokal logger for lagring av data, samt et GSM-modem. Målte trykkverdier ble bufret lokalt, og deretter oversendt til vannverkets SCADA-system en gang hvert døgn. Dette medførte at trykkverdier ikke var tilgjengelig i sanntid. DPCM estimerte trykkverdier  $p_i$  ved hvert målepunkt  $i$ , i sanntid. Sanntidsmodellen ble generert av DPCM ved å betrakte sanntids-trykket ved hvert målepunkt som en funksjon av målt trykk ved pumpestasjonen,  $p_{ps}$ , i sanntid, samt målt vannføring mot området  $F_{dist}$ . Følgende likning beskriver funksjonen:

$$p_i = p_{ps} + a + b * F_{dist}^2$$

(Formel 19)

Verdiene  $a$  og  $b$  ble fremskaffet ved bruk av minste kvadraters metode for bestemmelse av trykkfall mellom pumpestasjon og målepunkter for trykk som en funksjon av vannføring til området  $F_{dist}$ .

Ved denne situasjonen fungerte DPCM som en kontrollmodell som skaffer til veie tilbakemeldinger. Modellen baserte seg på en forventet input-verdi. Dette gjorde systemet til en blanding av kontroll basert på tilbakemeldinger fra systemet, kombinert med kontroll basert på forventningsverdier ((Ulanicki et al., 2000) som referert til av (Bakker et al., 2013)).

## Effekten ved endret trykk

Bakker et al. (2013) referer til (Araujo et al., 2006; Gomes et al., 2011; Vairavamoorthy & Lumbers, 1998) for beskrivelse lekkasjeandel som funksjon av gjennomsnittlig trykk i området:

$$q_{leak} = K_f * p^\beta$$

Formel 20

Hvor

$q_{leak}$  = Bakgrunnslekkasje [ $m^3/h$ ]

$K_f$  = Lekkasjekoeffisient [dimensjonsløs]

$\beta$  = Trykkeksponent [dimensjonsløs]

Trykkeksponenten kan variere mellom 0,5 og 2,5 (Gomes et al., 2011). I dette case-studiet ble lekkasjeeksponent  $\beta = 1.18$  valgt. Dette skjedde etter anbefalinger fra May (1994), og ble senere brukt av Araujo et al. (2006).

Ved endringer i trykk vil lekkasjeandel endres etter følgende forhold:

$$\frac{q_{leak,1}}{q_{leak,0}} = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^\beta \text{ [Dimensjonsløs]}$$

Formel 21

---

## Energibesparelser

Totale energibesparelser knyttet til implementering av dynamisk aktiv trykkstyring inngår i dette case-studiet ved følgende to punkter:

1. Besparelser knyttet til lavere pumpetrykk ( $dE_{pump}$ ) [KWh]
2. Besparelser knyttet til redusert lekkasjeandel ( $dE_{loss}$ ) [KWh]

Henholdsvis Formel 22 og Formel 23 beskriver henholdsvis punkt 1 og 2:

$$dE_{pump} = \frac{\rho * V * dp}{1000 * 3600 * \eta}$$

$$dE_{loss} = dV_{loss} * E_{spec}$$

Henholdsvis *Formel 22* og *Formel 23*

$\rho$  = Vannets massetetthet [1000 kg/m<sup>3</sup>]

$V$  = Pumpet vannvolum [m<sup>3</sup>]

$dp$  = Differanse i pumpetrykk

$\eta$  = Total virkningsgrad [dimensjonsløs, bestemmes til konstant  $\eta=0,60$ ]

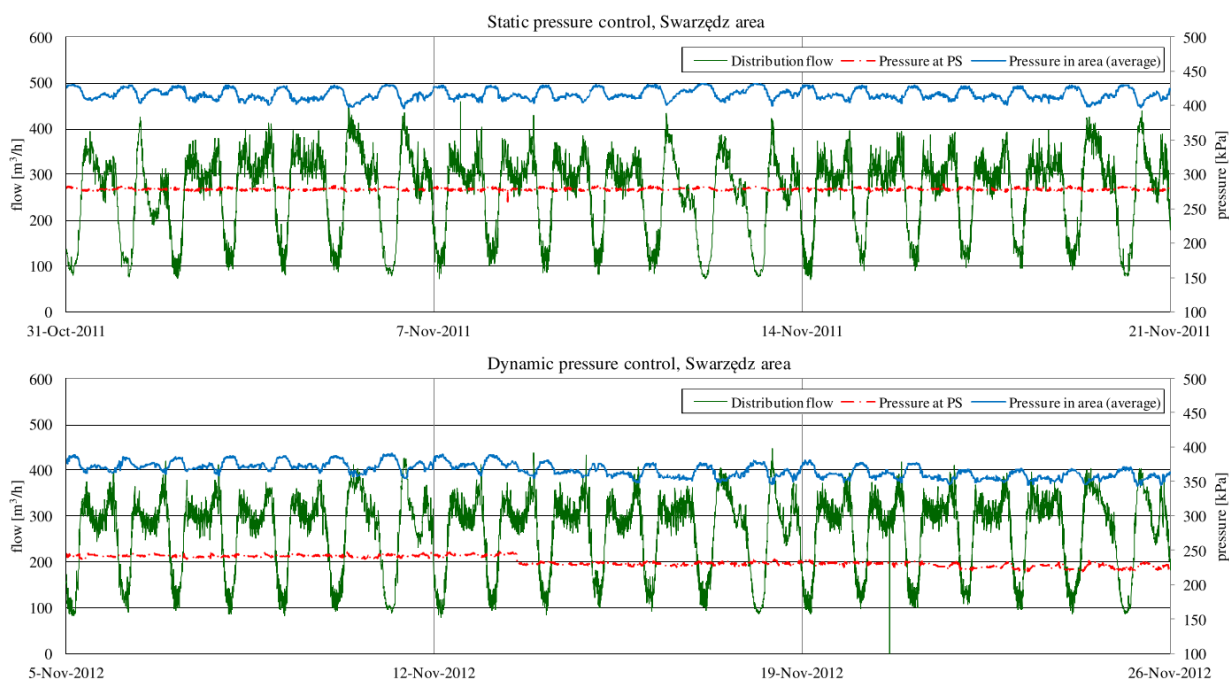
$dE_{loss}$  = Energibesparelser [KWh]

$dV_{loss}$  = Endringer i vanntap [m<sup>3</sup>]

$dE_{spec}$  = Spesifikk energiforbruk [KWh/m<sup>3</sup>]

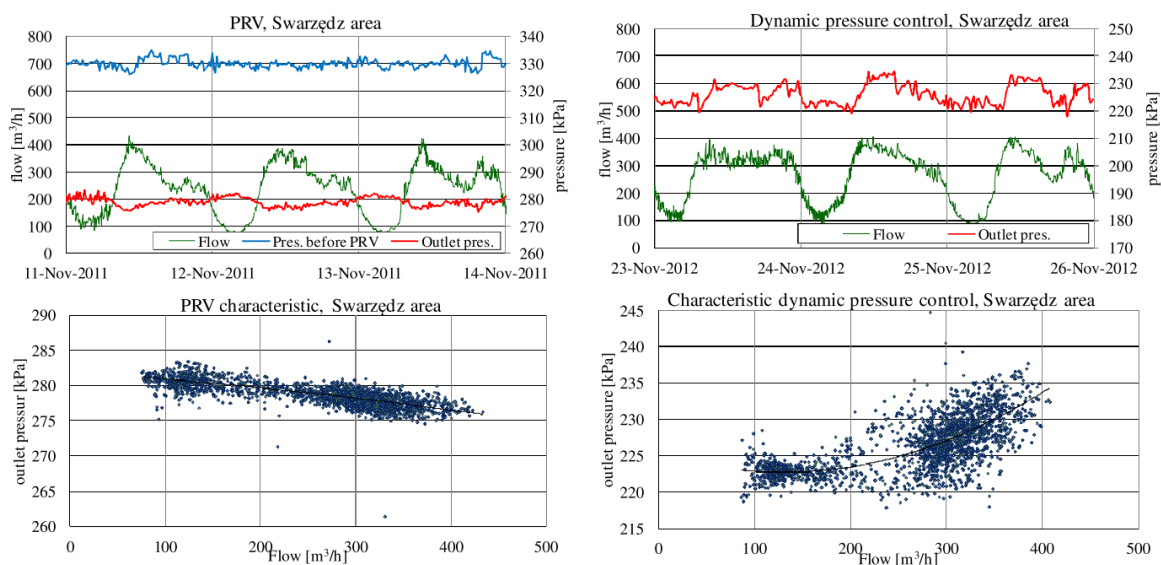
### 5.2.3 Resultater

Ved evaluering av resultater ble det sammenlignet data fra en periode med konvensjonell trykkkontroll, sammenlignet med dynamisk aktiv trykkstyring. Implementering av dynamisk styring skjedde over flere faser, og en periode med kalibrering av systemet var nødvendig. Det fantes derfor ingen periode med hurtig overgang fra konvensjonell styring til dynamisk styring. En periode på tre uker i november ble betraktet for hvert år: konvensjonell styring i november 2011, og dynamisk styring i november 2012.



Figur 16: Illustrasjon av forskjellen mellom statisk og dynamisk trykkstyring i Swarzędz-området.

Figur 16 tar for seg vannbehovet i systemet, utløpstrykket ved pumpestasjonen, og gjennomsnittlig trykk ved de to periodene. Ved opprinnelig scenario ble trykkreduksjonsventilen brukt til å redusere trykket mot en av de to forsyningssonene, Swarzędz. Pumpene kjørte opprinnelig med fast trykk ved utløpet på 330 kPa. Samtidig var ventilen innstilt på 280 kPa mot Swarzędz. Trykkreduksjonsventilen var av typen automatisk kontrollventil med størrelse DN250



Figur 17: Utløpstrykk i vannledningen ved konvensjonell bruk av statisk trykkstyring med PRV (figurer til venstre), og dynamisk trykkstyring (figurer til høyre).

Det kommer frem av Figur 17 at trykkreduksjonsventilen i evalueringsperioden fra 2011 kun fremviste en begrenset avhengighet i forhold til vannføring. Svingninger i vannføring medførte ikke svingninger av stor betydning for trykk, hverken før eller etter ventilen.



Ved dynamisk trykkstyring fungerte DPCM som en strømningsmodulert PRV, lik en integrert kontrollinnretning. En fordel ved DPCM fremfor en strømningsmodulert PRV er at DPCM automatisk tilpasset seg endringer i hydrauliske forhold, og forbrukskarakteristikk. Samtidig var det enklere å kalibrere DPCM, sammenlignet med tilfellet med PRV.

Ulempene ved bruk av DPCM knyttes til behovet for elektrisk strøm. Samtidig er det nødvendig med infrastruktur i form av kommunikasjonsverktøy mellom komponentene. Dette er ikke nødvendig ved bruk av en middels kontrollert PRV. Dette var likevel ikke et problem i dette case-studiet, grunnet at trykket ble styrt fra vannbehandlingsanlegget, som hadde sikker og permanent tilgang på strøm.

### Endringer i trykk og vannføring

Innførsel av DPCM medførte en reduksjon i pumpetrykk på 29 % (97 kPa). Trykkreduksjon i vanddistribusjonsnettet i Poznań-området var 23 % (100 kPa), og 12 % (50 kPa) i Swarzędz-området. En noe lavere trykkreduksjon i Swarzędz ble observert grunnet områdets opprinnelige bruk av PRV som allerede hadde redusert trykket i området. Se Tabell 5:

Tabell 5: Tabell som viser forskjeller mellom statisk og dynamisk trykkstyring i Poznań og Swarzędz.

	Static control	Dynamic control	Difference
<u>Poznań area:</u> Flow [m <sup>3</sup> /h]	214	306	+43%
PS pressure [kPa]	330	233	-29%
MP1-3 [kPa]	444	344	-23%
<u>Swarzędz area:</u> Flow [m <sup>3</sup> /h]	261	267	+2%
Outlet pressure [kPa]	279	233	-16%
MP4-9 [kPa]	417	367	-12%

Som en konsekvens av redusert trykk i systemet, ble også lekkasjeandelen redusert. Den totale lekkasjeandelen i systemet ble estimert til 565 000 m<sup>3</sup> per år. I 2011 utgjorde dette 11,3 % av alt produsert vann. Lekkasjeandelen i 2012 ble estimert til 450 000 m<sup>3</sup> per år, og utgjorde 9,0 %, tilsvarende en reduksjon på 113 500 m<sup>3</sup>. Ved bruk av Formel 20 ble gjennomsnittlig lekkasjereduksjon for systemet estimert til 20 %. I Poznań og Swarzędz ble lekkasjereduksjonen henholdsvis anslått til 26 % og 14 %.

### Energibesparelser

Henholdsvis Formel 22 og Formel 23 ble brukt til å beregne energibesparelser.  $V$  er 5 millioner m<sup>3</sup> per år, mens  $dp$  er 97 kPa. Dette resulterte i en reduksjon i energibehov for pumpe,  $dE_{pump}$ , ble estimert til 225 000 kWh per år, hvilket tilsvarte en reduksjon i kostnader på € 13 550.  $dV_{loss}$  er

endringen i vanntap i systemet, og tilsvarte 113 500 m<sup>3</sup>, jfr. resultatene over.  $E_{spec}$  betegner spesifikt energiforbruk for distribusjon av vann, og ble estimert til 0,108 kWh/m<sup>3</sup>. Reduksjon i energiforbruk,  $dE_{loss}$  ble estimert til 12 200 kWh/år, hvilket tilsvarer € 750. Se Tabell 6:

Tabell 6: Energibesparelser som følge av dynamisk trykkstyring.

	Energy [kWh/year]	Energy costs [€/year]	Difference
1. lower pump pressure	225,000	13,550	
2. reduced water loss	12,200	750	
Total	237,200	14,300	31.1%

---

### **5.3 Case: Økonomisk analyse av trykkstyring for reduksjon av lekkasje- og skadefrekvens**

I dette delkapittelet blir det gjengitt hvilke erfaringer som er gjort aktiv trykkstyring i forbindelse med det økonomiske aspektet. Dette litteraturstudiet beskriver et simulert forsøk i et eksisterende nettverk i Italia. Nettverket har tidligere blitt undersøkt i form av simuleringer. Disse simuleringene skjedde i forbindelse med hydrauliske betraktninger av systemet.

#### **5.3.1 Kost-nytte-perspektiv**

En kost-nytte-analyse skal vurdere tiltaks effekt opp mot kostnader knyttet til tiltakene. En analyse gjennomført av Creaco & Walski (2017) tar for seg en kost-nytte-analyse basert på bruk av trykkreduksjonsventiler og fjernstyrte sanntidskontrollerte ventiler for styring av trykk. Følgende case er basert på en rapport av (Creaco & Walski, 2017)

#### **5.3.2 Casebeskrivelse**

Creaco & Walski (2017) gjennomførte en kost-nytte-analyse for undersøkelse av kostnader knyttet til installasjoner og drift av lokalkontrollerte trykkreduksjonsventiler, og sanntidskontrollerte trykkreduksjonsventiler. Rapporten undersøker hvorvidt installasjon og drift av nevnte ventiltyper er kostnadseffektivt sammenlignet med et scenario hvor det ikke er iverksatt tiltak for aktiv trykkstyring. Rapporten ble utformet basert på innsamling av data fra Italia, og er basert på hydrauliske simuleringer over lengre perioder. Resultat ble estimert ved bruk av empiriske formler. Nettverket er eksisterende i Nord-Italia, og det er tidligere gjennomført praktiske hydrauliske forsøk. Denne analysen av kost-nytte-perspektivet ble gjennomført ved simuleringer.

#### **5.3.3 Bakgrunn**

Kostnader knyttet til lokalisering, diagnostisering, og innføring av tiltak varierer basert på ulike faktorer. En relevant faktor er designvalg for systemet. Lokale tilstander er en annen faktor. Variasjoner i lokale behov og tilstander vil medføre store variasjoner i kostnad og nytte av tiltak innføres. Det finnes derfor god løsning som kan gjennomføres effektivt i alle situasjoner.

Viktige faktorer å ta med i betraktningen kan eksempelvis være:

- Vannkostnad i det aktuelle området
- Kostnad for nødvendig utstyr og installasjon
- Omfang av lekkasjesituasjon
- Det aktuelle distribusjonsnettets størrelse
- Variasjoner i grad av effekt aktiv trykkstyring kan ha for lekkasjereduksjon
- Forbruksmønster og -variasjon

---

Kostnadsperspektivet er delt i flere aspekter: kostnader ved installasjon av utstyr, drift av utstyr, samt kostnader ved brudd og lekkasje. I hvert enkelt scenario må det gjøres en vurdering av hvorvidt kostnaden knyttet til skade på infrastruktur og tap av behandlet vann faktisk overstiger kostnaden for installasjon og drift av utstyr, samt lokalisering og diagnostisering av brudd og lekkasje.

(Formel 24) beskriver den totale kostnaden som sum av ulike kostnadselementer:

$$C_{wp} = C_{inst} + C_{var\ tot} + C_{burst\ tot}$$

(Formel 24)

Hvor

$C_{wp}$  = Totale kostnader knyttet til vannproduksjon ([NOK], eller alternative valutaer)

$C_{inst}$  = Kostnad for installasjon av trykkontroll (RTC, PRV)

$C_{var\ tot}$  = Totale variable vannrelaterte kostnader for drift og vedlikehold

$C_{burst\ tot}$  = Totale kostnader knyttet til reparasjon av brudd, eller skade på ledninger

## Installasjonskostnader

Det er blitt gjennomført analyse av to typer trykkontroll: bruk av tradisjonelle trykkreduksjonsventiler (PRV), og fjernstyrte sanntidskontrollerte trykkreduksjonsventiler (RTC).

Flere antakelser ble gjort under utarbeidelse av estimater for installasjonskostnader:

- Ventilene ble plassert i underjordiske kammer
- Det fantes én PRV eller RTC i hvert kammer. Stengeventiler ble montert ved innløp og utløp hos ventilene.
- Et alternativt «by-pass» ble installert for å kunne om dirigere vannstrømning ved et stengningsscenario eller ved vedlikehold
- Kommunikasjonskostnader ved bruk RTC-alternativet inkluderes
- Faste drift og vedlikeholdskostnader knyttet til komponenter inne i ventilkammer skal betraktes som neglisjerbare i forhold til opprinnelig kostnad ved installasjon, over ventilens lange levetid (eks. 40 års drift).
- Ingen kostnader knyttes til areal/tomt som kammeret er montert på.

---

## Variable drift- og vedlikeholdskostnader

Creaco & Walski (2017) beskriver at kostnaden for vann hos abonnentene er en dårlig indikator på hvorvidt kostnadsbesparelser knyttet til trykkstyring har vært kostnadseffektivt. Dette skyldes at prisen vil være høyere for konsumentene, etter som det skal dekke nedbetaling av gjeldskostnader knyttet til infrastruktur, faste drift- og vedlikeholdskostnader, samt lønnskostnader som ikke varierer med vannproduksjon. Marginalkostnaden, som betegner kostnaden det innebærer å produsere én ekstra m<sup>3</sup> med vann, representeres ved variable drift- og vedlikeholdskostnader. Dette er en bedre indikator på nytteverdien

Variable drift- og vedlikeholdskostnader påvirkes i stor grad av lekkasjeandel. Dette skyldes mengde vann som må pumpes. Strømkostnader og kostnader av kjemikalier til rensing og behandling av vann vil også inngå i variable drift- og vedlikeholdskostnader.

(Sullivan et al., 2015) som referert til av Creaco & Walski (2017) beskriver en likning for beregning av nåverdi for variabel kostnadsleddet brukt i (Formel 25) :

$$C_{var\ tot} = \sum_{i=1}^T \frac{C_{var\ i}}{(1+r)^i}$$

(Formel 25)

Hvor

$C_{var\ tot}$  = Totale kostnader knyttet til drift- og vedlikehold i evalueringsperioden.

$C_{var, i}$  = Kostnad for drift- og vedlikehold i et generisk år,  $i$ .

$i$  = Et gitt, generisk år i perioden

$T$  = Antall år i systemets livssyklus

$r$  = Rentekostnad

Vedlikeholdskostnader vil reduseres som følge av reduksjon i antall lekkasjer i nettet.

Driftskostnader kan reduseres ved lavere energitilførsel til pumper.

Kostnadene for vann har store variasjoner i Italia. Dette skyldes lokalisering og kvalitet på vannkilder. Det er registrert vann helt med en kostnad på 0,001 €/1000 L. Dette kan skyldes at vannet kommer fra en fjellkilde, og er av god kvalitet. Dermed kreves det minimalt med pumping, samt vannrensing. Det er også registrert vannkostnader på 1,0 €/1000 L. I dette tilfellet kreves det utstrakt bruk av pumping, samt at vannet må gjennom kostbare renseprosesser.

---

## Kostnader for reparasjon av brudd

Totale kostnader knyttet til reparasjon av brudd på ledninger påvirkes av trykkstyring. (Sullivan et al., 2015) viser at en reduksjon i servicetrykk fører til en reduksjon i årlige ledningsbrudd. Dermed reduseres også kostnader for reparasjon av brudd på ledninger.

$$C_{burst\ tot} = \sum_{i=1}^T \frac{C_{burst\ i}}{(1+r)^i}$$

Formel 26

Hvor

$C_{burst, i}$  = Reparasjonskostnad som følge av ledningsbrudd i et generisk år,  $i$ .

$C_{burst, tot}$  = Totale kostnader knyttet til reparasjon av ledningsbrudd i evalueringsperioden

$$\frac{n_{b,p} - n_b}{n_b} = -(1 - C_b) \left[ 1 - \left( \frac{h_{max,p}}{h_{max}} \right)^3 \right]$$

Formel 27

Her representerer  $n_{b,p}$  og  $h_{max,p}$  verdiene for  $n_b$  og  $h_{max}$  etter reduksjon i servicetrykk.  $C_b$  [dimensjonsløs] representerer brøkdelen av trykk-uavhengige ledningsskader og brudd, og varierer mellom 0 og 1.

## Fordeler

Fordeler som følge av trykkstyringstiltak påvirker total kostnad gitt ved likning

Trykkstyringstiltak øker installasjonskostnader  $C_{inst}$  grunnet installasjon av trykkreduksjonsventiler. Samtidig reduseres vedlikeholdskostnader. (Creaco & Walski, 2017) påpeker at dette skyldes redusert trykk, men også lavere tilført vannvolum i ledningen, samt en reduksjon i lekkasjebrudd. En kan dermed evaluere bruk av PRV og RTC, sammenlignet med et nullscenario uten iverksettelse av tiltak, ved bruk av følgende formel:

$$\text{Kostnadsreduksjon (\%)} = 100 * \frac{\Delta C_{w,p}}{C_{w,p}}$$

Formel 28

Hvor

$\Delta C_{w,p}$  = Reduksjon av  $C_{w,p}$  oppnådd gjennom generiske trykkreduksjonsmetoder (enten PRV eller RTC)

I denne konteksten ble det antatt at vannføring til abonnenter ikke ble påvirket av trykket, hvilket var tilfelle med konsumpsjon hos husstander. Dette medførte at vannverkets fakturerte inntekter ikke ble betydelig redusert av endringer i trykk.

---

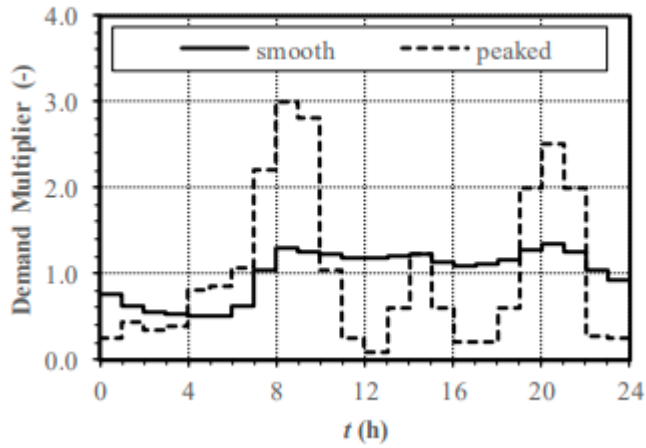
### 5.3.4 Metoder ved casestudiet

Trykksoneene som ble betraktet ble hentet fra et nettverk i Nord-Italia (Farina et al., 2014). Det var fra før gjennomført studier av området i forbindelse med trykkstyring. Disse studiene ble gjennomført av (Creaco & Franchini, 2013) i EPANET. Den første sonen som ble analysert («stor sone») utgjør totalt 26 noder, en node som representerer vannkilde, og 32 ledninger.

Systemet forsyner omtrent 30 000 innbyggere. Noden som representerer vannkilden ligger 35 moh, og har en konstant trykkehøyde på 40 m. Andre noder antas å ha en kotehøyde på 0 moh. Alle ledningsstrekke antas å ha en Manning ruhetskoeffisient på  $0,01 \text{ s/m}^{1/3}$  som er en typisk verdi for trykkkontrollventiler. Hydrauliske helning oppstrøms trykkkontrollventilen forholdt seg relativt konstant gjennom hele døgnet.

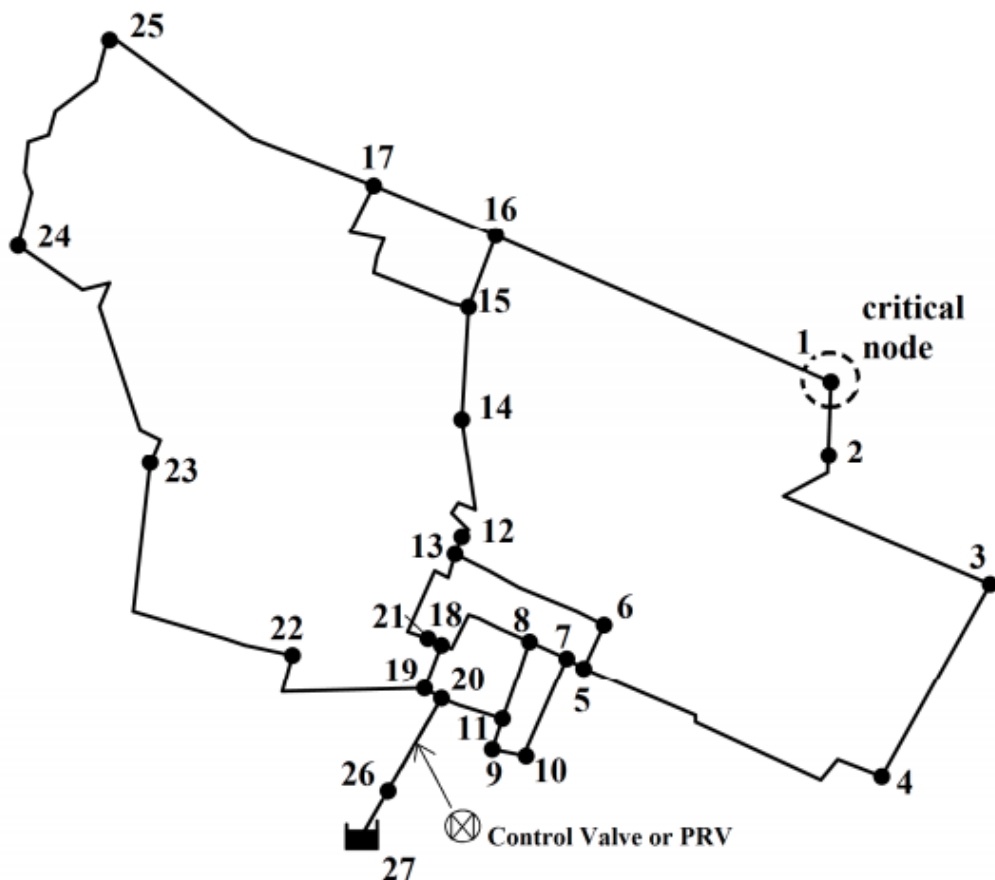
Den andre sonen som ble analysert, omtalt som «liten sone», skulle forsyne et område kun 1/10 av den store sonen. Dette systemet ble definert ved å skalere ned den store sonen med en faktor på 10 og  $\sqrt{10}$ , henholdsvis for noder og lengden av ledninger. Den mindre sonens ledninger ble designet på nytt. De nye ledningene ble i liten grad overdimensjonert, da diameteren på alle ledningene ble satt til over 100 mm. Dette ble gjort under sammenligning med forbruket hos abonnentene, og skulle ta høyde for økt etterspørsel, for eksempel ved behov for optimal drift ved brannvannsuttak.

To forbruksmønstre ble definert for de to systemene, for å representere daglige forbruksvariasjoner hos abonnentene i de to systemene. Den jevne forbrukskurven (smooth) ble lagt frem som en relativt glatt kurve, med døgnfaktorer som varierte mellom 0,5 og 1,34. Kurven for ujevnt forbruksmønster (peaked) hadde større variasjoner, og døgnfaktorene varierte mellom 0,1 og 3,0.



Figur 18: Timefaktorer over en 24-timers periode. To ulike forbruksmønstre ble skissert, et jevnt (smooth) og et ujevnt (peaked).

Hydrauliske simuleringer ble utført ved bruk av WaterGEMS. Strømningskoeffisienter ble kalibrert til tre ulike lekkasjenivåer: lav (lekkasjeprosent på 3% - 5%), middels (lekkasjeprosent på 15% - 16%), og høyt (lekkasjeprosent på 30% - 31%).



Figur 19: Kart over vanddistribusjonsnettet som ble betraktet i analysen.



I simuleringene ble RTC og PRV plassert i ved rør 31, markert nedstrøms fra node 26. Ventilen ble dimensjonert for å skape singulærtap lik helt åpen ventil. I det store systemet ble PRV og RTC installert henholdsvis med størrelser på DN350 og DN300. I det lille systemet ble disse henholdsvis installert i størrelse DN125 og DN100.

Tabell 7: Innkjøpskostnader (€) for PRV i det store og det lille systemet, henholdsvis i størrelsene DN350 og DN125.

Item	Quantity	large system	small system
Vault 5x10x6 ft	1	5,580	5,580
Gate Valves	3	856	180
PRV	1	9,431	1,649
Total		17,579	7,770

Tabell 8: Innkjøpskostnader (€) for RTC i det store og det lille systemet. Henholdsvis i størrelsene DN300 og DN100.

Item	Location	Quantity	large system	small system
Vault 5x10x6 ft	Control Node	1	5,580	5,580
Pressure Transducer	Control Node	1	800	800
Communications and Power to Site	Control Node	1	1,500	1,500
Vault 8x14x6 ft	Valve Site	1	7,440	7,440
Gate Valves	Valve Site	3	702	113.22
Motorized Plunger Valve	Valve Site	1	10,360	5,042
Communications and Power to Site	Valve Site	1	1,500	1,500
RTU-PLC	Valve Site	1	4,650	4,650
Total			33,937	26,851

Installasjonskostnadene ble oppgitt av en italiensk ventilprodusent, som referert til av (Creaco & Walski, 2017). Kostnader for det store systemet for installasjon av PRV og RTC ble på henholdsvis 17 579 € og 33 937 €. I det lille systemet kom installasjonskostnader på PRV og RTC på henholdsvis 7 770 € og 26 851 €. Det er verdt å merke seg at installasjonskostnaden for PRV nærmest ble halvert ved overgang fra stort til lite system. Ved RTC ble det bare observert en 20 % reduksjon i kostnad for installasjon ved overgang fra stort til lite system.

Sistnevnte reduksjon av kostnader knyttes til flere faste kostnader ved RTC som er uavhengig av størrelse, slik som økt energiforbruk, nødvendig kommunikasjonsutstyr, fjernstyrte sensorer, større kammer for lokalisering av ventil og materiell, samt programmering av PLC.

Totalt 18 WaterGEMS-simuleringer ble utført i hvert system. Simuleringene skulle betrakte de to forbruksmønstrene (smooth og peaked), tre lekkasjenivåer (lavt, middels, og høyt), samt tre typer kontroll (ingen kontroll, PRV, og RTC). I scenarioet med bruk av PRV, ble trykk nedstrøms node

---

20 (se Figur 15) innstilt slik at alle noder i nettverket hadde et trykk tilsvarende eller over ønsket trykk på 25 m. I scenarioet med bruk av RTC ble trykkreduksjonskoeffisienten bestemt ved hvert tidsintervall, slik at kravet om minimum 25 m høyde ble tilfredsstilt ved kritisk node 1.

### *5.3.5 Resultater*

#### **Trykk i det store systemet**

Trykket i det store systemet ble illustrert ved Figur 20. Det kommer frem av figuren at ved scenarioene med jevnt forbruksmønster viste PRV en stor effekt på trykkreduksjon i systemet. Dette sammenlignet med scenariet uten kontroll, som viste en forhøyet trykkehøyde i systemet. Bruk av RTC medførte bare en ytterligere minimal trykkreduksjon i systemet.

Ved scenarioene med ujevnt forbruksmønster viste bruk av PRV kun en minimal trykkreduksjon, sammenlignet med scenario uten kontroll. PRV måtte holde lav trykkreduksjon, for å kunne garantere at minimumsgrensen for ønsket trykk nedstrøms i systemet skulle overholdes over hele døgnet. I dette tilfellet kan PRV kun bidra til å holde trykkehøyde på 25 m klokken 8:00 om morgenen, slik det kommer frem av Figur 20. I tilfellet med ujevnt forbruksmønster vil bare RTC kunne gi en signifikant reduksjon i trykkehøyde ved bestemte innstillinger.

#### **Lekkasje i det store systemet**

Tabell 9 bekreftet resultatene i **Feil! Fant ikke referanseskilden.** som beskriver lekkasjerater under bruk av ulike kontrollstrategier. Tabellen viste at i tilfellet med jevnt forbruksmønster så bidro PRV mest til den betydelige lekkasjereduksjonen, mens bidraget fra RTC kun bidro til en marginal reduksjon. I tilfellet med ujevnt forbruksmønster ble det observert et mindre bidrag fra PRV sammenlignet med bruk av RTC, hvor fordelene med dynamisk innstilling kunne utnyttes.

Tabell 9: Daglige tilførte vannvolum og lekkasjeandeler ved ulike scenarier i det store systemet.

<b>Demand Pattern</b>	<b>Leakage Level</b>	<b>Kind of Control</b>	<b>Daily Supplied Volume (ML/day)</b>	<b>Leakage Rate (% of prod)</b>
smooth	low	no control	4.52	3.3
smooth	low	PRV	4.47	2.3
smooth	low	RTC-TCV	4.46	2.2
smooth	medium	no control	5.14	15.1
smooth	medium	PRV	4.90	10.9
smooth	medium	RTC-TCV	4.88	10.6
smooth	high	no control	6.28	30.5
smooth	high	PRV	5.77	24.3
smooth	high	RTC-TCV	5.71	23.6
peaked	low	no control	4.51	3.2
peaked	low	PRV	4.49	2.8
peaked	low	RTC-TCV	4.46	2.1
peaked	medium	no control	5.13	15.0
peaked	medium	PRV	5.05	13.6
peaked	medium	RTC-TCV	4.88	10.6
peaked	high	no control	6.26	30.3
peaked	high	PRV	6.22	29.8
peaked	high	RTC-TCV	5.72	23.7

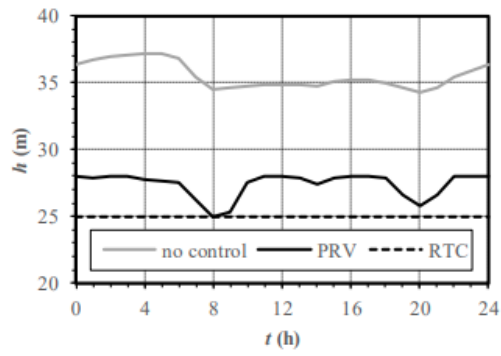
Footnote: 1 ML/day = 0.26 MGD

Tabell 10: Daglige tilførte vannvolum og lekkasjeandeler ved ulike scenarier i det lille systemet.

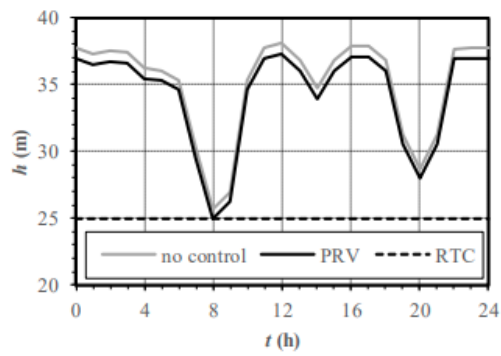
<b>Demand Pattern</b>	<b>Leakage Level</b>	<b>Kind of Control</b>	<b>Daily Supplied Volume (ML/day)</b>	<b>Leakage Rate (% of production)</b>
smooth	low	no control	0.4608	5.3
smooth	low	PRV	0.4519	3.4
smooth	low	RTC	0.4518	3.4
smooth	medium	no control	0.5209	16.2
smooth	medium	PRV	0.4903	11.0
smooth	medium	RTC-TCV	0.4899	10.9
smooth	high	no control	0.6297	30.7
smooth	high	PRV	0.5607	22.2
smooth	high	RTC	0.5594	22.0
peaked	low	no control	0.4605	5.2
peaked	low	PRV	0.4529	3.6
peaked	low	RTC	0.4516	3.4
peaked	medium	no control	0.5203	16.1
peaked	medium	PRV	0.4944	11.7
peaked	medium	RTC	0.4897	10.9
peaked	high	no control	0.6297	30.7
peaked	high	PRV	0.5710	23.6
peaked	high	RTC	0.5594	22.0

Footnote: 1 ML/day = 0.26 MGD

### Smooth Demand Pattern

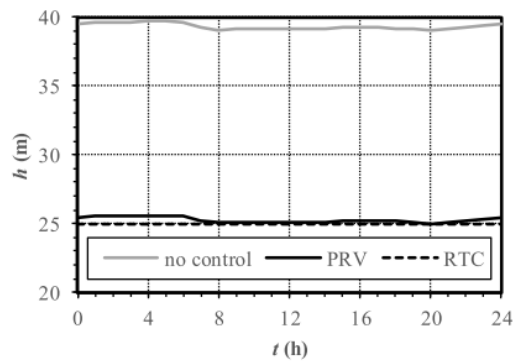


### Peaked Demand Pattern

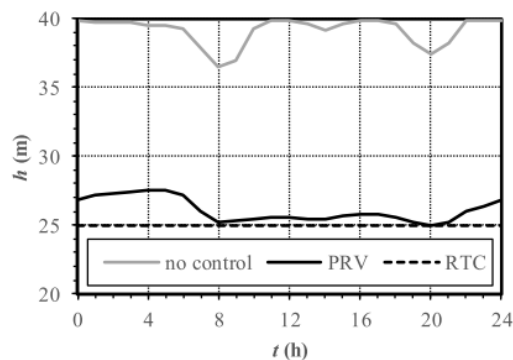


Figur 20: Trykkehøyde i det store systemet som funksjon av tid ved jevnt og ujevnt forbruksmønster. Grafene viser trykkehøyde ved bruk av PRV, RTC, samt ingen trykkontroll.

### Smooth Demand Pattern



### Peaked Demand Pattern



Figur 21: Trykkehøyde i det lille systemet som funksjon av tid ved jevnt og ujevnt forbruksmønster. Grafene viser trykkehøyde ved bruk av PRV, RTC, samt ingen trykkontroll.

### Forskjellen mellom det lille og store systemet i forhold til lekkasje og trykk

Det lille systemet er overdimensjonert, noe som fører til en relativt uniform trykkehøyde nedstrøms ledningsstrek 31, hvor ventilen er lokalisert. Dette skyldtes overgangen til et mer hardført system, hvilket gir bedre driftsbetingelser sammenlignet med et mindre robust system. En daglig kalibrering av PRV førte til trykk- og lekkasjereduksjon, og viste god effekt selv ved ujevnt forbruksmønster. Bruk av RTC førte ikke til en betydelig reduksjon utover bidraget fra PRV, både for jevnt og ujevnt forbruksmønster. Ved bruk av RTC ved ujevnt forbruksmønster, i det store systemet, var effekten av større betydning.

## Reparasjon av skader

### 1. Stort system

Tabell 11: Årlig antall sprekker ( $n_b$ ) og årlig reparasjonskostnad ( $C_{burst}$ ) som funksjon av maksimal daglig trykkehøyde ( $h_{max}$ ) ved kontrollnode i det store systemet.

Demand Pattern	Leakage Level	Kind of Control	$h_{max}$ (m)	$n_b$ (-)	$C_{burst}$ (€)
smooth	low	no control	39.66	4.00	3,600
smooth	low	PRV	26.61	3.44	3,097
smooth	low	RTC	25.00	3.40	3,060
smooth	medium	no control	39.06	4.00	3,600
smooth	medium	PRV	26.94	3.46	3,116
smooth	medium	RTC-TCV	25.00	3.41	3,069
smooth	high	no control	37.12	4.00	3,600
smooth	high	PRV	27.48	3.52	3,172
smooth	high	RTC	25.00	3.44	3,100
peaked	low	no control	39.96	4.00	3,600
peaked	low	PRV	34.23	3.70	3,333
peaked	low	RTC	25.00	3.40	3,056
peaked	medium	no control	39.62	4.00	3,600
peaked	medium	PRV	35.44	3.77	3,395
peaked	medium	RTC	25.00	3.40	3,061
peaked	high	no control	38.09	4.00	3,600
peaked	high	PRV	37.29	3.95	3,556
peaked	high	RTC	25.00	3.43	3,084

Forventet antall årlige brudd oppgis i Tabell 11 ved  $n_b$ -verdi.  $N_b$ -verdi ble satt til 4 for det store systemet i scenariet som representerte fravær av trykkontroll. Dette ble basert på  $\lambda = 0,031$  sprekker/år/Km, samt  $L = 131$  Km for systemet som ikke var oppført som skisse i Figur 3. Maksimal daglig trykkehøyde i systemet er markert i Tabell 11 som  $h_{max}$ .  $C_{burst}$  representerer kostnader som følge av skade. Verdier for  $C_{burst}$  ble bestemt basert på en antakelse om reparasjonskostnad  $C_{burst} = 900$  € for en enkelt skade. Reduksjonen av antall skader skyldtes, ved jevnt forbruksmønster, hovedsakelig bruk av PRV. Ved ujevnt forbruksmønster bidro RTC i større grad enn PRV, grunnet muligheten for variabel styring ved RTC.

## 2. Lite system

Tabell 12: Årlig antall sprekker ( $n_b$ ) og årlig reparasjonskostnad ( $C_{burst}$ ) som funksjon av maksimal daglig trykkehøyde ( $h_{max}$ ) ved kontrollnode i det lille systemet.

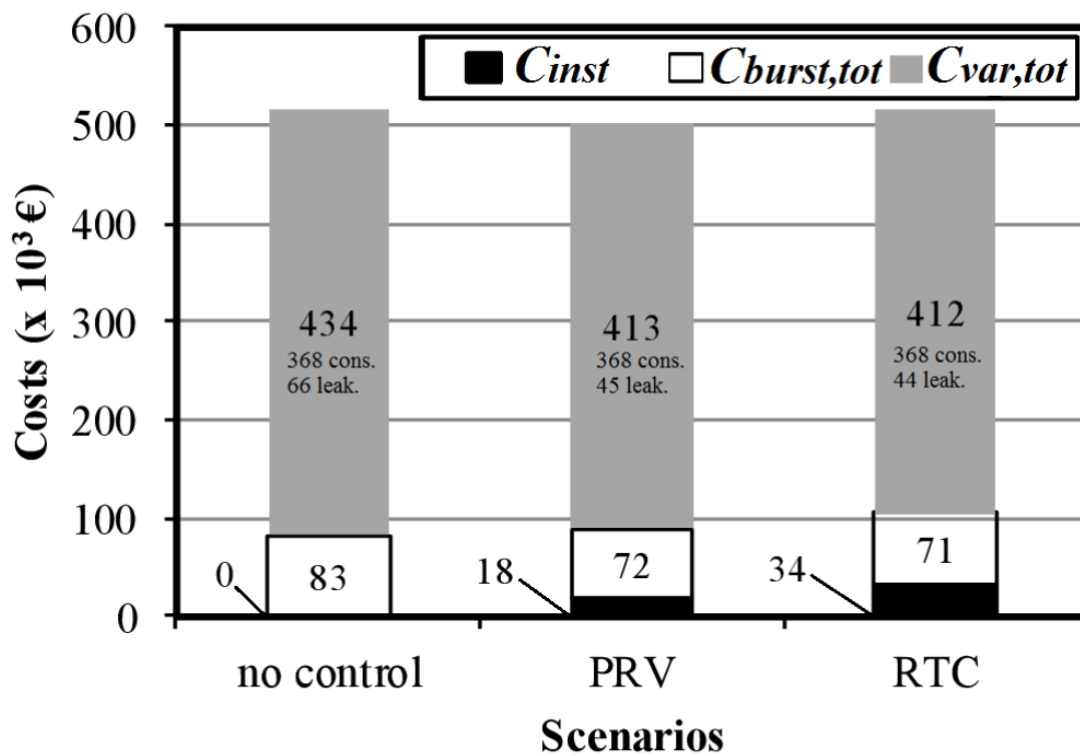
<b>Demand Pattern</b>	<b>Leakage Level</b>	<b>Kind of Control</b>	$h_{max}$ (m)	$n_b$ (-)	$C_{burst}$ (€)
smooth	low	no control	39.91	2.00	1,800
smooth	low	PRV	25.46	1.70	1,533
smooth	low	RTC	25.00	1.70	1,528
smooth	medium	no control	39.85	2.00	1,800
smooth	medium	PRV	25.50	1.70	1,534
smooth	medium	RTC-TCV	25.00	1.70	1,529
smooth	high	no control	39.69	2.00	1,800
smooth	high	PRV	25.58	1.71	1,536
smooth	high	RTC	25.00	1.70	1,530
peaked	low	no control	39.99	2.00	1,800
peaked	low	PRV	27.62	1.73	1,559
peaked	low	RTC	25.00	1.70	1,528
peaked	medium	no control	39.97	2.00	1,800
peaked	medium	PRV	27.79	1.73	1,561
peaked	medium	RTC	25.00	1.70	1,528
peaked	high	no control	39.87	2.00	1,800
peaked	high	PRV	28.04	1.74	1,565
peaked	high	RTC	25.00	1.70	1,529

Verdi for  $n_b$  ble satt til 2, for å ta høyde for lavere lengde på ledninger. Dette ble basert på beregning for nedskalering av det lille systemet ( $100 \text{ km} * \sqrt{10} = 41,4 \text{ km}$ ). Kortere lengder på rør, i kombinasjon med mindre rørdiameter, gir  $\lambda = 0,049 \text{ skader}/(\text{år} * \text{Km})$  for det lille systemet. Bruk av PRV var tilstrekkelig for å stabilisere trykkehøyde i systemet på ønsket nivå, 25 m. Dette resultatet gjaldt ved både jevnt og ujevnt forbruksmønster.

## Økonomi

Bruk av WaterGEMS simuleringer gav resultater for abonnenters daglige forbruk, samt daglig lekkasjevolum. I tillegg gav simuleringen oversikt over trykkehøyde ved noder, samt lekkasjeandeler. Resultatene ble betraktet for alle 18 scenarier, jfr. Tabell 11 og Tabell 12.  $T$  ble satt til 40 år, og  $r$  ble 0,03. Dette representerte typiske verdier henholdsvis for systemets livssyklus, og verdifaktor for systemet.

Disse resultatene gjorde det mulig å estimere verdier for  $C_{inst}$ ,  $C_{burst,tot}$ ,  $C_{wp}$ , samt  $C_{var,tot}$ . Dette gjaldt for tilfeller uten trykkontroll, samt ved bruk av PRV og RTC. Resultatene ble gitt som en funksjon av vannkostnader per enhet vann som varierte fra 0,005 €/1000L til 1,0 €/1000L i hvert av de 18 scenarioene, for begge systemstørrelser.



Figur 22: Kostnader ved de tre scenariene.



---

Figuren beskriver et eksempel på kostnadselementer for det store systemet i en situasjon med jevnt forbruksmønster, og betrakter en situasjon for enhetskostnad for vann lik 0,01 €/1000L.

Scenario uten trykkontroll:

$$C_{inst} = 0 \text{ €}$$

$$C_{burst,tot} = 83\,213 \text{ €}$$

$$C_{var,tot} = 434\,002 \text{ €}$$

$$C_{w,p} = 517\,215 \text{ €}$$

Scenario for bruk av PRV:

$$C_{inst} = 17\,579 \text{ €}$$

$$C_{burst,tot} = 72\,031 \text{ €}$$

$$C_{var,tot} = 413\,357 \text{ €}$$

$$C_{w,p} = 502\,966 \text{ €}$$

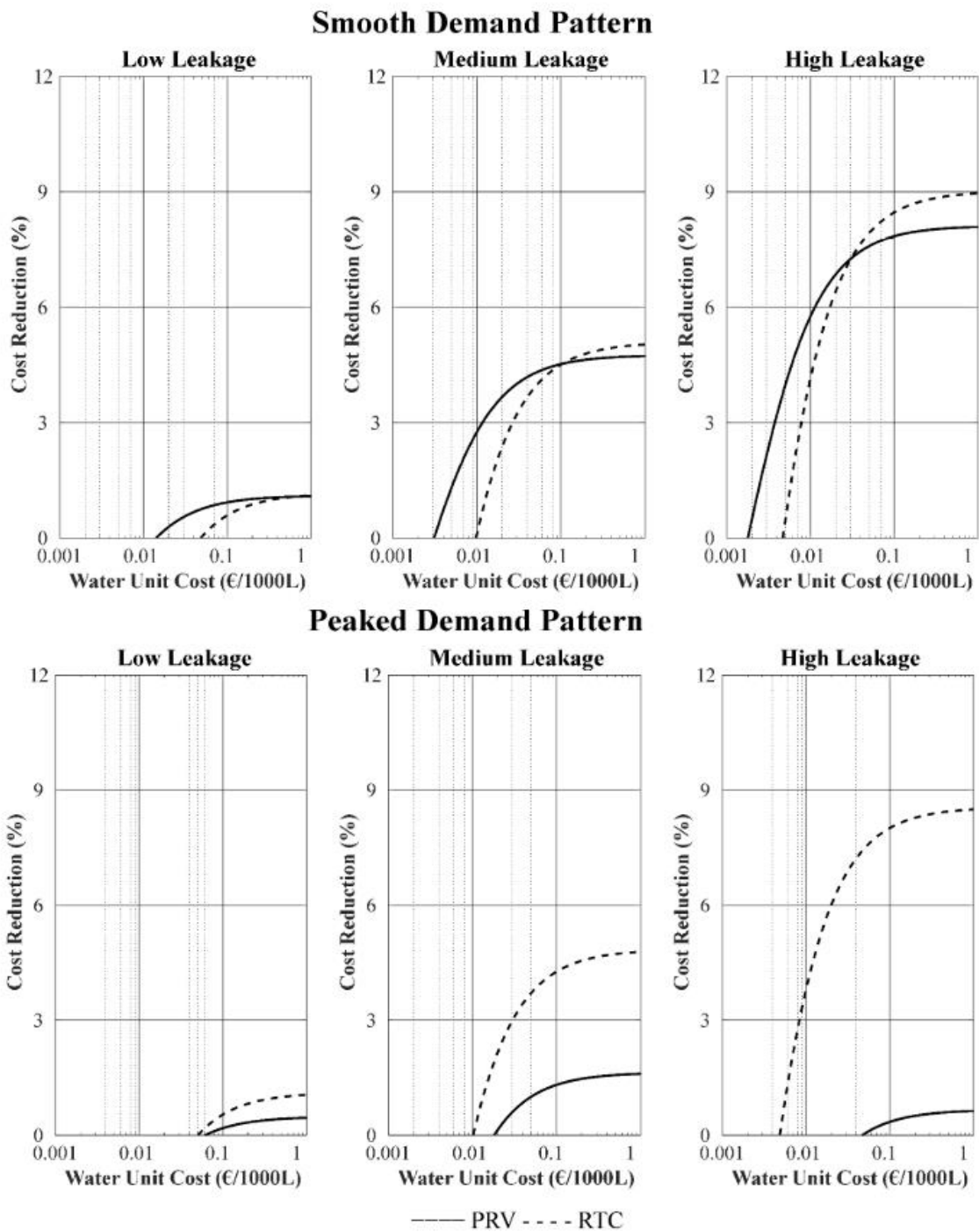
Scenario for bruk av RTC:

$$C_{inst} = 33\,937 \text{ €}$$

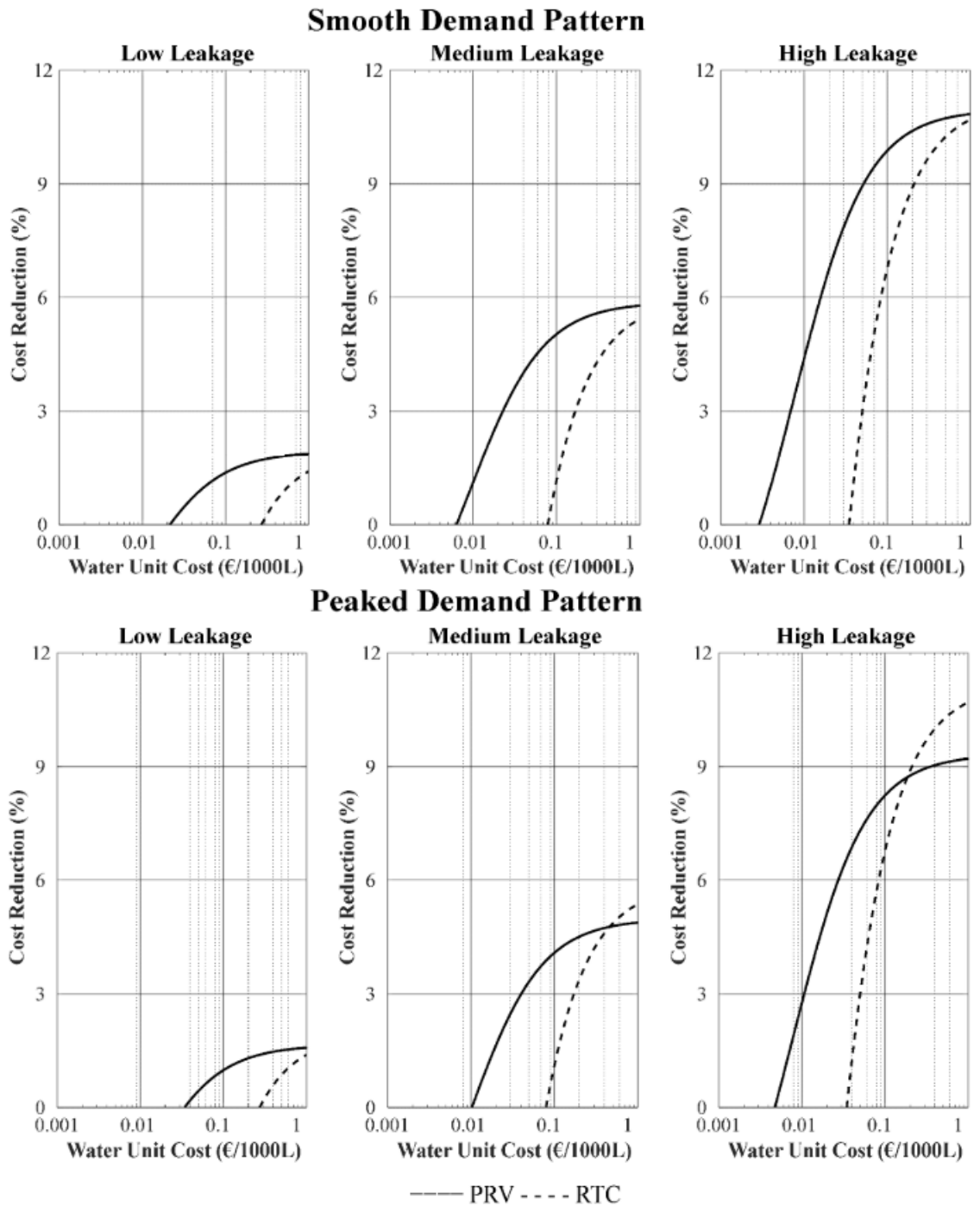
$$C_{burst,tot} = 70\,934 \text{ €}$$

$$C_{var,tot} = 411\,897 \text{ €}$$

$$C_{w,p} = 516\,768 \text{ €}$$



Figur 23: Start system. Prosentvis kostnadsreduksjon ved PRV og RTC sammenlignet med scenarie uten kontroll, som funksjon av variabel enhetskostnad for vann.



Figur 24: Lite system. Prosentvis kostnadsreduksjon ved PRV og RTC sammenlignet med scenarie uten kontroll, som funksjon av variabel enhetskostnad for vann.

---

## 6 Diskusjon

Diskusjonskapittelet i denne oppgaven drøfter og belyser resultater gitt ved spørreundersøkelser og litteraturstudier. Resultatene skal belyses og settes i sammenheng med de andre resultatene som kommer frem mellom de forskjellige kommunene i kapittel 4, og de forskjellige case-studiene i kapittel 5. Kapittelet skal også opplyse hvorvidt resultatene stod i stil med problemstillingen i oppgaven. Drøftingen i denne delen av kapittelet skal beskrive om resultatene svarte på problemstillingen.

Oppbygning av kapittel 6 skjer på følgende måte:

- Beskrivelse og diskusjon av resultater gitt av kommunene som deltok i undersøkelsen: hvordan er tilstanden i kommunen per april 2021 i forhold til lekkasjeandeler, og kostnader knyttet til lekkasje? Kjenner kommunene til aktiv trykkstyring, og har det blitt iverksatt noen form for aktiv trykkstyring i de respektive kommunene?

- Diskusjon og beskrivelse av resultater fra litteraturstudiet i kapittel 5. Drøfting av styrker og svakheter ved hver enkelt case, samt sammenligning av resultater.

### 6.1 Spørreundersøkelser

#### 6.1.1 Tilstand i forbindelse med lekkasjeandel og kostnader i kommunene

Spørreundersøkelser knyttet til aktiv trykkstyring viste svært ulike grader av erfaring og kunnskap hos kommunene. Tilstandene i ledningsnettene varierer naturligvis fra kommune til kommune, hvilket også var tilfelle blant de fire kommunene som deltok i undersøkelsen. Oslo kommunes estimerte lekkasjeandel på omtrent 30 % per april 2021. Dette betraktes som høyt, og er ikke tilfredsstillende for bærekraftig lekkasjeandel som påpekt av Malm et al. (2018). Resultatet er likevel samsvarende med gjennomsnittet i Norge på 31 % fra 2018.

Kommunen hadde ikke god kjennskap til kostnader forbundet med produksjon og transport av vann, og var per april 2021 under utredning. Det samme gjaldt tiltak for lekkaselokalisering og implementering av tiltak mot lekkasje, hvilket også var under utredning på dette tidspunktet. Kartlagte lekkasjer ble som regel utbedret uavhengig av mulige kostnadsbesparelser. Dette er et interessant resultat, ettersom det er positivt for distribusjonsnettets tilstand at det prioriteres utbedring av lekkasjer i distribusjonsnettets. Samtidig er det usikkert om det finnes en økonomisk besparelse sett i en kost-nytte-sammenheng.

---

I Trondheim kommune ble det lagt frem en tydeligere oversikt over gjeldende tilstand i kommunen. Lekkasjeandelen ble estimert til 28 %, hvilket ligger noe lavere enn landsgjennomsnittet. Årlig budsjett på 8 millioner kroner omfattet 4 årsverk, samt strøm- og vedlikeholdskostnader. Dette tolkes som et positivt resultat, fordi det innebar tydelige rammer for arbeidet med kartlegging av lekkasjeandeler, og tiltak mot disse. God oversikt over gjeldende tilstand og kostnadsrammer er svært viktig i arbeidet for langsiktig reduksjon av lekkasjeandeler. Drammen kommune og Bergen kommune hadde store lekkasjeandeler, på henholdsvis 38 % og 36 %. Dette lå godt over landsgjennomsnittet, og tydet på at tilstanden i kommunene var kritisk. Samtidig hadde begge kommunene god oversikt over kostnader knyttet til lokalisering og utbedring av lekkasjer. Bergen viser en detaljert oversikt over selvkost knyttet til vannbehandling og distribusjon. Resultatet fra spørreundersøkelsen viser at kostnaden for driftskostnader lå på 1135 kr per person tilknyttet, samt selvkost på 1250 kr per person tilknyttet for vannforsyning. Drammens budsjett for 2021 knyttet til lokalisering og utbedring av tiltak var på 2,4 millioner kroner.

Ved å vise til kostnader som fordeler seg per person tilknyttet vannverkene, ga Bergen en tydeligere innsikt i hva tjenester knyttet til VA faktisk kostet enkeltpersonen. Dette bidrar til å gi allmennheten et perspektiv på kostnaden av slike tjenester, og hvordan store lekkasjeandeler faktisk øker kostnaden for vann som fordeler seg på abonnentene.

Lekkasjeandelene varierte blant kommunene. Dette var som forventet, da det er godt kjent at det eksisterer variasjoner i norske ledningsnett.

### ***6.1.2 Aktiv trykkstyring i kommunene***

Spørreundersøkelsen avdekket varierende kunnskapsnivå angående aktiv trykkstyring. Bergen, Oslo og Trondheim var kjent med metoden, og hadde implementert varierende grad av aktiv trykkstyring. I Oslo og Trondheim ble

Resultatet fra spørreundersøkelsen om aktiv trykkstyring viste at samtlige kommuner opplevde store variasjoner i trykk innenfor en og samme sone, av forskjellige årsaker. Oslo, Bergen, og Trondheim praktiserte forskjellige varianter av aktiv trykkstyring. Alle fire kommuner opplevde variasjoner i trykk innenfor én og samme sone.

I Oslo, Trondheim og Bergen var det satt i gang ulike tiltak for aktiv trykkstyring. I Oslo ble det benyttet mengdestyrt dynamisk trykkreduksjonsventil, samt tidsstyrt pumpe. I Trondheim ble det benyttet bermad-ventiler som automatisk justerte settpunktet etter behov, spesielt på nattetid. I Bergen ble det benyttet vannmengderegulerte pumpestasjoner for aktiv trykkstyring. Videre ble det benyttet timesbasert trykkstyring, konstant utgangstrykk, samt trykkregulering med hensyn

---

på kritisk punkt. I Drammen ble det ikke benyttet aktiv trykkstyring utover bruk av trykkreduksjonskummer.

Et positivt aspekt ved undersøkelsen er at kommunene oppgir at de var fornøyde med investeringene knyttet til aktiv trykkstyring. Kommunene oppga derimot at de mente det var vanskelig å måle effekten av styringstiltak, samt aktiv trykkstyring. Dette var et forventet resultat, da det kreves en lenger evalueringsperiode for å se merkbar forskjell i forbindelse med kostnadsbesparelser, og kost-nytte-effekt.

## **6.2 Litteraturstudie**

### **Case: Aktiv trykkstyring for lekkasjereduksjon i Sør-Italia**

#### **S0**

S0 representerte scenariet uten tiltak for lekkasjereduksjon. S0 viste en høy lekkasjeandel på 3600 m<sup>3</sup> per dag. Dette scenariet ble brukt som et utgangspunkt ved sammenligning av effekt fra de tre andre scenariene.

#### **S1**

Resultatet fra case i delkapittel 5.1 viste at aktiv trykkstyring hadde en signifikant effekt på lekkasjereduksjon. Aktiv trykkstyring sammenlignet med vedlikeholdsarbeid, viste at lokalisering og utbedring av skade alene hadde en god effekt i forbindelse med lekkasjereduksjon. Dette kom tydelig frem ved implementering av S1, der lekkasjeandelen ble redusert med en 1/6, fra 3600 m<sup>3</sup> per dag til 3000 m<sup>3</sup> per dag, jfr. Figur 13. Ettersom S1 kun inkluderte rehabilitering og oppgradering av hovedledningen i systemet, kan det konkluderes med at hovedledningens skader og lekkasjer er av stor viktighet: hovedledningen forsyner begge systemer, og optimalisert drift av denne ledningen vil være avgjørende for et stabilt system, samt sikker leveranse av vann.

Videre ble det observert et forhøyet trykknivå ved S1, gitt ved Figur 14. Dette er intuitivt, da en stor reduksjon av vannlekkasje ut av ledningen vil føre til redusert trykk, og dermed mindre grad av forsyningssikkerhet. Det forhøyede trykknivået på sin side kan være ha flere ulemper: nye skader og lekkasjer kan oppstå som følge av kontinuerlig høyere trykk i ledningen. Det kan derfor konkluderes med at S1 førte til en betydelig lekkasjereduksjon, men mangel på ytterligere elementer i form av aktiv trykkstyring kan virke negativt, spesielt på lang sikt. Et viktig tiltak mot denne ulempen, er noe Bosco et al. (2020) simulerte i rapporten: ytterligere tiltak som går under aktiv trykkstyring. Implementering av tiltak for trykkstyring kan bidra til å forebygge en andel av fremtidige skader og lekkasjer, utover det man erfarte ved optimalisering av trykknivået etter rehabilitering av nord-sørgående ledning.

#### **S2**

---

Ved S2 ble to ventiler montert ved innløpet til hvert av systemene. S2 inkluderer S1s rehabiliteringstiltak for utbedring av skader på hovedledningen. Ettersom ventilene var klassiske skruventiler, måtte kalibrering av ventilene skje ved drift av operatører, som måtte basere ventilinnstillinger på trykk målt ved kritiske noder. Ved S2 inngikk det i styringstiltaket at ventilene skulle holde minimalt med trykk i de to sonene, samtidig som det ble sørget for tilstrekkelig vannforsyning hos abonnenter. S2 bestod dermed av aktiv trykkstyring til en viss grad: ventilene ble kontinuerlig justert basert på målinger fra kritiske noder. I kombinasjon med S1 var dette et viktig bidrag til trykkoptimalisering, slik det kommer frem av Figur 14.

Figuren viser at S2, i kombinasjon med S1, bidro til en ytterligere lekkasjereduksjon fra 16.6 % reduksjon, til 35 %. Lekkasjeandelen på 2330 m<sup>3</sup> per dag viste at aktiv trykkstyring i kombinasjon med oppgradering og vedlikehold hadde en svært god effekt på lekkasjereduksjon for dette nettverket. Lekkasjereduksjonen i DMA2 ved bruk av S2 viste en særskilt stor lekkasjereduksjon: omtrent 1/3 reduksjon i lekkasjeandel sammenlignet med lekkasjeandel ved implementering av S1, hvilket ga en stor prosentvis reduksjon.

### **S3**

S3 ble kombinert med S2 og S1, og inkluderte bruk av sanntidsstyrte trykkreduksjonsventiler ved innløpet til hver av de to sonene. Sanntidsstyring innebar aktiv trykkstyring i stor grad: sanntidsstyring basert på tilstanden målt ved kritiske noder, i kombinasjon med algoritmer som ga klare styringsregler, ga en ytterligere optimalisering av trykk. Det påpekes at ytterligere lekkasjereduksjon for S3 sammenlignet med S2 var relativt beskjeden: 37,5 % lekkasjereduksjon sammenlignet med S2 som ga 35 % reduksjon. På tross av den lille differansen i lekkasjeandel, viste Figur 14 at trykket i nettet ble sterkt redusert over et 24-timers intervall, samt at trykket ble langt mer stabilt med lavere variasjoner i trykk. Trykket holdt seg omtrent på 30 m, som var i overenstemmelse med bestemt nedre grense for trykknivå. Begge soner representerte en trend ved bruk av RTC som var lik ved bruk av PRV til en viss grad: reduksjon av trykk frem til klokken 7:00 om morgenen var en tydelig trend, noe som er intuitivt sett i forhold til døgnvariasjoner. Det skal nevnes at Figur 14 representerte en dag med karakteristiske trender under perioden. Ved store avvik i forbruksmønster, sammenlignet med tilstanden karakterisert ved Figur 14, så er det nærliggende å forvente andre resultater.

### **Diskusjon rundt sammenligning av scenarier**

De ulike scenariene viste at lekkasjereduksjon økte som følge av økende antall tiltak iverksatt. Dette er et forventet resultat. Rehabilitering av skadde ledninger vil gi en stor gevinst i form av lekkasjereduksjon, men det kreves ytterligere tiltak for en mer optimalisert, langsiktig løsning. Et særskilt viktig poeng å trekke frem i denne analysen er S2, hvor en kombinasjon av rehabilitering

---

av ledning kombinert med aktiv trykkstyring i form av bruken av PRV ga en signifikant reduksjon i lekkasjeandel. Figur 13 viste at det mest effektive scenariet i forbindelse med lekkasjereduksjon var S3. Samtidig krever RTC mer avansert teknologi, og kan medføre økte installasjonskostnader, samt kostnader knyttet til drift, jfr. økning i  $C_{inst}$  og  $C_{var,tot}$  i (Formel 24), delkapittel 5.3.3 .

RTC ga liten grad av ytterligere lekkasjereduksjon, men vil kreve større investeringer knyttet til nevnte kostnadselementer. Det kan tenkes at dette lønner seg i lengden, ved at kostnadsbesparelser knyttet til reparasjon av skader og brudd øker, samt at kostnadsbesparelser knyttet mindre andeler tap av behandlet vann. Et realistisk utfall ved valg av scenario å implementere i praksis vil være S2. Dette vil gi en mer kortsiktig kostnadsbesparelse, i form av betydelig lekkasjereduksjon.

En styrke ved dette case-studiet er at det poengterer en ideell løsning ved bruken av kombinerte metoder for lekkasjereduksjon. Mer tradisjonelle metoder for lekkasjereduksjon innebærer lokalisering og iverksettelse av tiltak mot lekkasje. Mer moderne betraktninger anvender bruk av aktiv trykkstyring som supplement for ytterligere lekkasjereduksjon. Dette studiet kastet lys over begge metoder, og viste positive resultater knyttet til metodene som ble brukt.

En svakhet ved dette studiet er mangelen på informasjon i forbindelse med et kost-nytte-aspekt. Gitt at styringsgruppen kun tar hydrauliske parametere med i betraktningen, vil S3 være det foretrukne alternativ. Sett at økonomiske hensyn tas i betraktning, kan det være mer gunstig å velge S2 på kort sikt. Konklusjonen i forhold til dette studiet er at både aktiv trykkstyring og rehabilitering av ledninger gir en gevinst i form av betydelig lekkasjereduksjon.

### **Case: Aktiv trykkstyring, Poznań, Polen**

Dette case-studiet baserte seg på en sammenligning av konvensjonell statisk trykkstyring, sammenlignet med en variant av aktiv trykkstyring. I dette studiet ble det satt et fokus på pumpestyring, gjennom bruk av kommunikasjonsteknologi og algoritmer for styring av pumper. Studiet tok sikte på å undersøke både lekkasjereduksjon, og kostnadsbesparelser i form av redusert energiforbruk ved pumpene. VSP ble brukt i systemet. De fem identiske pumpene håndterte trykkstyringen i systemet ved hjelp av algoritmer beskrevet i kapittel 5.2.2 Dette innebærer at dette case-studiet betraktet pumpestyring fremfor aktiv trykkstyring ved bruk av ventil, og tilhørende teknologi. En viktig likhet med ventilstyring ved aktiv trykkstyring, er bruken av avanserte algoritmer og kommunikasjonsteknologi for styring av komponentene bak trykkstyringen.

Ni målepunkter for måling av trykk ble installert, slik at systemet totalt utgjorde 11 målepunkter. Økningen i antall målepunkter er viktig for prosessen: god informasjon, og relevant data er nødvendig for å skaffe til veie en så nøyaktig oversikt som mulig over systemets tilstand vedrørende de ulike styringsparameterne som inngår i algoritmene for aktiv trykkstyring.



---

Resultatene viste at bruk av DPCM ga reduksjon av pumpetrykk på 29 %. Dette fordelte seg på Poznan (23 %) og Swarzedz (12 %), hvilket medførte en trykkreduksjon på henholdsvis 100 KPa og 50 KPa. Resulterende reduksjon av lekkasjeandel fordelt over Poznań og Swarzędz viste reduserte lekkasjeandeler anslått til henholdsvis 26 % og 14 %, hvilket innebar en gjennomsnittlig reduksjon på 20 % for systemet. Dette resultatet viste at bruk av pumper med dynamiske hastighetskontroll ga en positiv effekt i forhold til lekkasjereduksjon.

Dette ble sammenlignet med bruk av PRV for trykkreduksjon i % i Swarzędz-området, som var den tidligere løsningen for trykkstyring i området. En reduksjon i lekkasjeandel fra 11,3 % til 9,0 % kom frem i studiet.

Kost-nytte-perspektivet baserte seg på betraktninger av reduserte energikostnader ved styring av pumper. Tabell 6: Energibesparelser som følge av dynamisk trykkstyring. viste at reduksjonen i pumpetrykk per år førte til energibesparelser på 225 000 KWh per år. Kostnadsbesparelser ble dermed 13 550 €. Reduksjon i lekkasjetap førte til en kostnadsbesparelse på 750 €, slik at summen av besparelser i kostnader resulterte i 14 300 €. Det diskuteres ikke i studiet hvorvidt kostnadene for installasjon av pumper førte til en innkjøps- og installasjonskostnad som overskred besparelser knyttet til redusert energiforbruk og lekkasjeandel. Basert på informasjon fra kapittel 5.3.3 er det intuitivt å anta at det medførte kostnader knyttet til innføring av DPCM. Casen som er studert i kapittel 5.3 undersøkte energibesparelser knyttet til energikostnader ved drift av pumper, samt kostnader forbundet med vanntap. Dette innebar at en mer helhetlig analyse av kost-nytte falt bort. **Dersom** man ser bort fra nevnte punkter, kan det konkluderes med at forsøket ga en betydelig gevinst, både i form av redusert lekkasjeandel, samt kostnads- og energibesparelser knyttet til drift av pumper.

### **Case: Økonomisk analyse av trykkstyring for reduksjon av lekkasje- og skadefrekvens**

Formålet med dette case-studiet var å estimere ulike kostnadselementer ved trykkstyring. Videre ble det sammenlignet kostnader knyttet til ulike scenarier for trykkstyring. Kostnadselementene for systemet ved bruk av ingen kontroll, PRV og RTC ble analysert og oppdelt i installasjonskostnader, variable drift- og vedlikeholdskostnader, samt kostnader knyttet til reparasjon av skader og brudd på ledninger.

Case-studiet baserer seg på en kost-nytte-analyse av tre ulike scenarier for trykkstyring. Det første scenariet innebærer en situasjon uten trykkstyring. Dette scenariet ble brukt som utgangspunkt for måling av effekt ved PRV og RTC.

#### **Stort system – trykk og lekkasjeandel**

Ved betraktning av høyt lekkasjenivå i det store systemet, viste Figur 20 en betydelig reduksjon av trykkehøyde i systemet ved bruk av PRV ved jevnt forbruksmønster. I samspill med forbruksmønsteret i løpet av døgnet fulgte trykkehøyden i systemet samme trender, men med et

---

mye jevnere mønster. I tilfellet med jevnt forbruksmønster, og høy lekkasjeandel, viste figuren at PRV ga det største bidraget i form av trykkreduksjon i systemet. Utover dette var bidraget ved bruk av RTC minimalt, hvilket antyder at PRV kan være tilstrekkelig ved tilfeller med mindre variasjoner i forbruk over døgnet. En fordel med RTC er relativt stabilt trykk gjennom kontinuerlig styring: trykkehøyden i systemet stabiliserte seg på omtrent 25 m gjennom hele perioden.

Ved ujevnt forbruksmønster spilte RTC en viktigere rolle for reduksjon av lekkasjeandel. I likhet med tilfellet for jevnt forbruksmønster, medførte bruken av RTC at trykkehøyden i systemet stabiliserte seg ved omtrent 25 m. Dette skyldes sannsynligvis muligheten for trykkstyring i sanntid: ventilen reagerte på en plutselig endring i forbruk ved å kompensere for dette ved optimalisert åpning og lukking av ventilen. I slike situasjoner kommer fordelene ved sanntidsstyrt trykkreduksjonsventil klart til syne: RTC er mer mottakelig for justering av plutselige og hurtige endringer i forbruk. Bruk av PRV ved ujevnt forbruksmønster ga nesten ingen trykkstyringseffekt sammenlignet med scenario uten kontroll. Dette er et interessant resultat, fordi høydetap som følge av PRV måtte holdes lavt. Dette ble gjort for å sikre vannforsyning ved tidspunkt med forekomst av lavt trykk i systemet.

I forhold til lekkasje viser Tabell 9 at ved jevnt forbruksmønster, og høyt lekkasjenivå, vil PRV være tilstrekkelig for å oppnå en signifikant lekkasjereduksjon. Dette stemmer overens med trenden ved trykkehøyde som beskrevet over. Ytterligere bidrag fra RTC vil kun gi en minimal økning i lekkasjereduksjon, og kan virke overfladisk i et kost-nytte-perspektiv. Trenden var lik for situasjoner med jevnt forbruksmønster, for lavt, middels og høyt lekkasjenivå. Ved ujevnt forbruksmønster vil det også i tilfellet med lekkasjeandel være RTC som har en signifikant effekt. Konklusjonen basert på dette er at PRV var et optimalt valg for lekkasje- og trykkstyringssituasjoner med jevnt forbruksmønster. RTC var et optimalt valg ved et mer ujevnt forbruksmønster, hvor dynamisk styring er fordelaktig.

### **Forskjell på lite og stort system – trykk og lekkasjeandel**

Det lille systemet ble skalert ned som beskrevet i delkapittel 5.3.4 sammenlignet med det store systemet. Figur 20 og Tabell 9 for stort system ble sammenlignet med Figur 21 og Tabell 10. Her kom det frem at det lille systemet er overdimensjonert. Et interessant aspekt ved dette er at systemet som er designet mer robust vil oppleve lavere trykkvariasjoner. Dette kommer klart til uttrykk i Figur 21, hvor tilfredsstillende trykkstyring skjer ved bruk av daglig innstilling av PRV, selv ved ujevnt forbruksmønster. Dette resultatet viste signifikansen ved systemdesign av større systemer.

Slike design er langt mer kostbare enn valg av mindre dimensjoner. Dermed er det naturlig å anta at systemene blir designet med mindre dimensjoner, for å ikke medføre store kostnader knyttet til bygging og installasjon av anlegg.

---

## Reparasjonskostnader

Tabell 11 og Tabell 12 representerte skadefrekvens på henholdsvis stort og lite system. Det er tydelig at forventet antall årlige brudd eller skader, samt kostnad knyttet til reparasjon ved skade var relativt proporsjonal med dimensjoneringen av systemet. I likhet med diskusjon omkring trykk og lekkasjeandel i de to respektive systemene, var skade- og bruddfrekvens avhengig av forbruksmønster og systemets hardførhet.

### Økonomisk sammenligning av systemene

For det store systemet viste Figur 23 at PRV og RTC ikke medførte noen gevinster ved lave enhetskostnader for vann. Det kom tydelig frem at PRV ga best kostnadsreduksjon ved jevnt forbruksmønster. Ved jevnt forbruksmønster ble også fordelene ved bruk av PRV og RTC forskjøvet mot lavere enhetskostnad for vann. Til sammenligning ble kurvene faseforskjøvet mot høyre ved ujevnt forbruksmønster.

En generell oppsummering av funnene tydet på at ved jevnt forbruksmønster er PRV den foretrukne løsningen, både med tanke på ytelse og kost-nytte. Ved mer ujevnt forbruksmønster var RTC den foretrukne løsningen. En annen tydelig konklusjon som kan trekkes ut fra Figur 23 er at RTC økte kostnadsbesparelsen desto høyere enhetskostnaden for vann var. Dette hang sammen med at installasjonskostnaden for RTC ble kompensert for ved reduksjon i lekkasjevolum av vann ved høyere enhetskostnader.

I det lille systemet var PRV så å si alltid den foretrukne løsningen. Unntaket var ved svært høye enhetskostnader for vann. Dette skyldtes antakelig at vannføringen i det lille systemet var lavere, og at installasjonskostnader for RTC oversteg besparelsen i redusert lekkasjevolum med unntak av ved høye enhetskostnader for vann.

Figur 22 og resultater fra side 60 viste et eksempel på et tilfelle med jevnt forbruksmønster i det store systemet, med enhetskostnad lik 0,01 € per 1000 L vann. I tilfellet uten trykkstyring endte  $C_{w,p}$  på 517 215 €, og utgjorde det mest kostbare scenariet. Dette til tross for at installasjonskostnader bortfalt.

Høye kostnader i forbindelse med reparasjon av brudd og skader,  $C_{burst\ tot}$ , samt variable drift- og vedlikeholdskostnader,  $C_{var, tot}$ , utgjorde en betydelig større andel av kostnadene sammenlignet med scenariene med trykkstyring. Dette kunne knyttes til forhøyet trykk i systemet, som medvirket til økte reparasjonskostnader samt vedlikeholdskostnader. Det er intuitivt at mangel på trykkstyring bidro til å opprettholde høye kostnader i form av tapt vann, reparasjon, og drift- og vedlikehold.

Bruk av PRV ga den laveste totalkostnaden, på tross av at ingen av kostnadselementene var minimert i forhold til de andre scenariene. Installasjonskostnaden knyttet til RTC er omtrent dobbelt så høy som for PRV, som resulterte i at RTC kun ga en minimal kost-nytte-effekt sammenlignet med scenario uten trykkstyring.

---

## **Avslutning**

Case-studiet avdekket at RTC hovedsakelig var gunstig i spesielt krevende systemer og situasjoner, slik som ved store variasjoner i forbruksmønster, eller ved høyere kostnader for vann. Dette gjaldt sett i et kost-nytte-perspektiv, hvor kostnader for installasjon, drift og vedlikehold ble tatt med i betraktningen. PRV var en foretrukket løsning ved situasjoner med jevnere forbruksmønster, samt ved utforming av mer robuste systemer. Scenarier med trykkstyring var under vanlige omstendigheter å foretrekke fremfor ingen trykkstyring. Aktiv trykkstyring virket best under kombinasjon med konvensjonell trykkstyring, jfr. resultater fra Case 1 og Case 3.

## **Drøfting av konklusjoner ved caser**

Case-studiene viste positive resultater knyttet til bruk av aktiv trykkstyring. I hvert av studiene ble det observert en lekkasjereduksjon som følge av trykkstyring. Det er spesielt gjort positive erfaringer ved bruk av PRV, jfr. case 1 og case 3 i delkapittel 5.1 og 5.3. Case 2 og 3 beskrev kost-nytte i forbindelse med faktiske kostnadsbesparelser ved aktiv trykkstyring. Trenden viste at redusert trykk og lekkasjevolum hadde positive kostnadmessige følger. Dette gjaldt spesielt ved redusert andel skader på ledningsnettet, men også sett i forbindelse med lavere andel lekkasjevann. En svakhet ved litteraturstudiet var at kun case 2 (delkapittel 5.2) tok for seg aktiv pumpestyring, noe som ga et litt tynt kunnskapsgrunnlag i mangelen på alternative kilder. En utfordring ved aktiv trykkstyring omfattet optimal bruk av RTC. Det kom frem at sanntidsstyrte ventiler var en viktig komponent ved aktiv trykkstyring, men at kostnadene ikke alltid lønte seg. Høye installasjonskostnader ble ikke nødvendigvis alltid kompensert for ved andre besparelser på kort sikt, som observert i case 1 og case 3.

---

## **7 Konklusjon**

### **7.1 Forskningsspørsmål**

#### **Spørreundersøkelse**

##### ***7.1.1 Hvordan er tilstanden i kommunene i forbindelse med lekkasjeandeler og kostnader for lokalisering, diagnostisering og utbedring av dette?***

Resultater fra spørreundersøkelsen viste at lekkasjeandelene i kommunene var høye. Tre av fire kommuner viste til et lekkasjenivå omtrent på, eller over landsgjennomsnittet. Kostnader knyttet til lokalisering, diagnostisering og utbedring av lekkasjer varierte noe fra kommune til kommune. Oslo kommune kunne ikke fremvise en konkret oversikt over disse kostnadene, da dette per april 2021 var under utredning. Lekkasjeandelen i kommunen lå på omtrent 30 %. Drammen kommune kunne vise til en årlig budsjettpost knyttet til disse tiltakene på 2,4 millioner kroner for 2021. Lekkasjeandelen i kommunen var på 38 %. Trondheim kommunes budsjettpost for 2021 knyttet til dette omfattet fire årsverk, samt ulike driftskostnader knyttet til denne prosessen. Årlig budsjett var på 8 millioner kroner for 2021. Trondheims lekkasjeandel var på 26 %. Bergens lekkasjeandel var på 36 %. Kommunen la frem kostnader ved å henvise til kostnaden fordelt per person tilknyttet distribusjonsnett: kostnaden for driftskostnader lå på 1135 kr per person tilknyttet, samt selvkost på 1250 kr per person tilknyttet for vannforsyning.

##### ***7.1.2 Er det satt i gang tiltak for aktiv trykkstyring, og hvilke tiltak er i så fall iverksatt?***

I Oslo, Trondheim og Bergen var det satt i gang ulike tiltak for aktiv trykkstyring. I Oslo ble det benyttet mengdestyrt dynamisk trykkreduksjonsventil, samt tidsstyrt pumpe. I Trondheim ble det benyttet bermad-ventiler som automatisk justerte settpunktet etter behov, spesielt på nattestid. I Bergen ble det benyttet vannmengderegulerte pumpestasjoner for aktiv trykkstyring. Videre ble det benyttet timesbasert trykkstyring, konstant utgangstrykk, samt trykkregulering med hensyn på kritisk punkt. I Drammen ble det ikke benyttet aktiv trykkstyring utover bruk av trykkreduksjonskummer.

#### **Litteraturstudie**

##### ***7.1.3 Hvilke tiltak for aktiv trykkstyring er gjennomført i studiene?***

Studiene tok hovedsakelig for seg simuleringer ved tre forskjellige vandistribusjonsnett: to i Italia, og ett i Polen. I disse simuleringene ble konvensjonelle trykkstyringstiltak gjerne gjennomført i kombinasjon med aktiv trykkstyring, jfr. delkapittel 5.1. Tiltak for aktiv trykkstyring omfattet bruk av konvensjonelle trykkreduksjonsventiler (PRV) enten styrt ved

---

forhåndsdefinerte styringsregler eller ved manuell håndtering av ventilen. To av studiene undersøkte bruk av sanntidsstyrt trykkreduksjonsventil (RTC), hvor ventilen kommuniserte med teknologi som samlet inn data om tilstanden i systemet.

Et annet viktig tiltak som ble gjennomført i case i delkapittel 5.2 omfattet bruk av rotodynamiske pumper med dynamisk turtallskontroll.

#### ***7.1.4 Bidro disse tiltakene til reduksjon av lekkasjeandel?***

Tiltakene bidro til effektiv lekkasjereduksjon. I Case 1 fra Sør-Italia (delkapittel 5.1) bidro rehabilitering i kombinasjon med bruk av PRV til en lekkasjereduksjon på 35 %. Ytterligere bruk av RTC førte til en lekkasjereduksjon på 37,5 %. I Case 2 fra Polen (delkapittel 5.2) ble lekkasjeandelen redusert med 20 % ved bruk av totalt 5 VSP (Variable Speed Pump). I Case 3 (delkapittel 5.3) ble det vist at korrekt bruk av enten PRV eller RTC medførte en betydelig reduksjon i lekkasjeandel, men dette var situasjonsbestemt. Aktiv trykkstyring virket best under kombinasjon med konvensjonell trykkstyring, jfr. resultater fra Case 1 og Case 3. I Case 1 og Case 3 ble det gjort klart at PRV fungerer like greit som bruk av RTC ved bestemte forutsetninger, og at det derfor må gjøres en vurdering i hvert tilfelle.

#### ***7.1.5 Er tiltakene effektive i en kost-nytte-sammenheng?***

Det var ikke mulig å trekke en konklusjon på hvorvidt simuleringene i Case 1 var effektive sett i en kost-nytte-sammenheng, basert på resultatene fra det bestemte case-studiet alene. Basert på resultater fra Case 2 og Case 3 ble det observert at bruk av aktiv trykkstyring medførte kostnadsbesparelser i form av redusert lekkasjenivå, lavere belastning på ledningsnett og infrastruktur, samt reduserte strømkostnader ved kjøring av pumpe på lavere turtall. Case 3 slo fast at bruk av PRV var det mest kostnadseffektive gitt et system med jevnt forbruksmønster, og høy lekkasjeandel. Bruk av RTC ga et godt utgangspunkt for god kost-nytte-verdi, men dette var under forutsetning av at systemet var preget av et ujevnt forbruksmønster, og/eller at enhetskostnaden for vann var relativt stor. Det kan derfor konkluderes med at aktiv trykkstyring i mange tilfeller har en god kost-nytte-verdi, men dette må undersøkes nærmere i hvert tilfelle.

Det er også viktig å se effekten av tiltakene over en forholdsvis lang periode for å kunne danne seg en formening om dette.

#### **Avsluttende konklusjon**

Det kan konkluderes med at det er gjort gode erfaringer med bruk av aktiv trykkstyring, både internasjonalt, men også i Norge. De norske resultatene er mer uklare, blant annet ved usikkerhet rundt kostnader og hydrauliske effekter på lang sikt. Samtlige forskningsspørsmål er belyst, og peker i retning av aktiv trykkstyring som en effektiv metode for lekkasjereduksjon i vandrdistribusjonsnettet.

---

## Referanser

- Aquatics International. (2017, October). *10 Things to Know About Variable Speed Pumps*.  
<https://www.horizonpoolsupply.com/news-media/10-things-to-know-about-variable-speed-pumps>
- Araujo, L. S., Ramos, H., & Coelho, S. T. (2006). Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management*, 20, 133–149.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-006-4635-3>
- Auen Grimenes, A., Jerstad, P., & Sletbak, B. (u.å.). *Fluidmekanikk*.  
<https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/vedlagte-emner/FYS1000/v11/Fluidmekanikk.pdf>
- Bakker, M., Rajewicz, T., & Kien, H. (2013). Reducing energy consumption and leakage by active pressure control in a water supply system. *Asset Management for Enhancing Energy Efficiency in Water and Wastewater Systems, International Water Association, Marbella - Spain, 24-26 April 2013, April 2013*.
- Bermad. (2020, March). *How does a pressure reducing valve work? - Bermad*.  
<https://www.bermad.com.au/how-to/how-does-a-pressure-reducing-valve-work/>
- Bosco, C., Campisano, A., Modica, C., & Pezzinga, G. (2020). Application of rehabilitation and active pressure control strategies for leakage reduction in a case-study network. *Water (Switzerland)*, 12(8), 2215. <https://doi.org/10.3390/w12082215>
- Bureau of Reclamation. (2020). *Water Facts - Worldwide Water Supply*.  
<https://www.usbr.gov/mp/arwec/water-facts-ww-water-sup.html>
- Buttingsrud, O. R. (2019). *Energieffektivisering og besparelser*. ABB På Miljø Og Teknikk.  
[www.miloogeteknikk.no](http://www.miloogeteknikk.no)
- Cassa, A. M., & Van Zyl, J. E. (2013). Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 62(4), 214–223. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.094>
- Columbia Basin Trust. (2013). *A Workshop for Communities Implementing Water Loss Management Prepared for Columbia Basin Trust by IKEN Services Ltd. May 2013 Leak Detection Methods. - ppt download*. <https://slideplayer.com/slide/4560505/>
- Creaco, E., & Walski, T. (2017). Economic Analysis of Pressure Control for Leakage and Pipe Burst Reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(12), 04017074. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000846](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000846)
- Deyi, M., Van Zyl, J., & Shepherd, M. (2014). Applying the FAVAD concept and leakage number to real networks: A case study in Kwadabeka, South Africa. *Procedia Engineering*,

- 
- 89, 1537–1544. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.450>
- Engan, J. A. (2018). *TPS210 Transport av væsker og gasser Finnemoore & Franzini*. Engineers Edge. (u.å.). *Moody Chart, Moody's Table Engineers Edge*. Retrieved June 17, 2021, from [https://www.engineersedge.com/fluid\\_flow/pressure\\_drop/moody\\_chart.htm](https://www.engineersedge.com/fluid_flow/pressure_drop/moody_chart.htm)
- EPANET.no. (2020). *Generelt om nettmodeller - EPANET.no*. <https://epanet.no/bruksomrader/generelt-om-nettmodeller/>
- Flatin, A., Kløve, M., & Møller Rokstad, M. (2021). *Trykkoptimalisering på vannledningsnettet – beste praksis*. Norsk Vann rapport 263 2021.
- Gomes, R., Marques, A. S., & Sousa, J. (2011). Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 8(2), 65–77. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2010.542820>
- Helseth, L. E. (2020). *Reynolds' tall – Store norske leksikon*. Store norske leksikon. [https://snl.no/Reynolds%27\\_tall](https://snl.no/Reynolds%27_tall)
- Malm, A., Svensson, G., & Røstum, J. (2018). *Beregning av bærekraftig lekkasjenivå*. Norsk Vann rapport 239.
- Mosetlhe, T. C., Hamam, Y., Du, S., & Monacelli, E. (2020). *A survey of pressure control approaches in water supply systems*. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/W12061732>
- Norsk Vann. (2019). *Introduksjon Hydrodynamikk*. Norsk Vann. [https://www.norskvann.no/images/gjertrude/pdf/Vedlegg\\_03\\_-\\_Bernoulli\\_eksempler.pdf](https://www.norskvann.no/images/gjertrude/pdf/Vedlegg_03_-_Bernoulli_eksempler.pdf)
- Ødegaard, H. (2014). Drikkevannsnettet. I *VA-teknikk* (pp. 24–34). Norsk Vann.
- Page, P. R., Zulu, S., & Mothetha, M. L. (2019). Remote real-time pressure control via a variable speed pump in a specific water distribution system. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 68(1), 20–28. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.074>
- Piller, O., & Van Zyl, J. E. (2014). Incorporating the FAVAD leakage equation into water distribution system analysis. *Procedia Engineering*, 89, 613–617. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.485>
- Shammas, N. K., & Al-Dhowalia, K. H. (1993). Effect of Pressure on Leakage Rate in Water Distribution Networks. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 5(2), 213–226. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30581-6](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30581-6)
- Skjærstad, E. M. (2013). *Ledningsnettet - Norsk Vann*. <https://norskvann.no/index.php/vann/ledningsnett>
- Stavanger kommune. (2014). *Lekkasjereduksjon*. <https://www.stavanger.kommune.no/siteassets/skjema-a-a/bolig-og-bygg/vann-og-avlop/lekkasjereduksjonsplan-vann.pdf>
- Subramanian, R. S. (2014). Engineering Bernoulli Equation. *Department of Chemical and*



---

*Biomolecular Engineering, Clarkson University, 1–19.*

[https://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch330/notes/Engineering Bernoulli Equation.pdf](https://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch330/notes/Engineering%20Bernoulli%20Equation.pdf)

Sullivan, W. G., Wicks, E. M., & Koelling C.P. (2015). *Engineering Economy, 16th Edition* (16th ed.).

Ulanicki, B., Bounds, P. L. M., Rance, J. P., & Reynolds, L. (2000). Open and closed loop pressure control for leakage reduction. *Urban Water*, 2(2), 105–114.

[https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00048-0](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00048-0)

Vairavamoorthy, K., & Lumbers, J. (1998). Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(11), 1146–1154.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1998\)124:11\(1146\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1998)124:11(1146))

van Zyl, J. E., & Cassa, A. M. (2014). Modeling Elastically Deforming Leaks in Water Distribution Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), 182–189.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000813](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000813)



**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway