



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Veileder: Vegard Nilsen

Analyse av lekkasjereduksjon ved trykkstyring

- En casestudie av en trykkesone i Oslo kommune.**

Leakage reduction using pressure management

- A case-study of a pressure zone in Oslo municipality.

Thach Hoang Dang Nguyen

Master i Industriell Økonomi

Forord

Masteroppgaven er skrevet ved Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelig universitet. Oppgaven er et symbol på et avsluttende kapittel som femårige student innen industriell økonomi med teknologisk med fordypning i vann- og miljøteknikk. Oppgaven ble skrevet våren 2020 og har et omfang på 30 studiepoeng.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Vann- og avløpsetaten i Oslo kommune (Oslo VAV). Jeg vil takke Oslo VAV som har gitt meg mulighet til å skrive om et spennende tema. Det er særlig Chetan Hathi, Lars A. Wermskog og Lars J.Hem som har gjort dette samarbeidet mulig. Takk for tilliten og møtene.

I Oslo VAV vil jeg gjerne takke alle ansatte som har stilt til disposisjon i form av modell og informasjonsutveksling. Dere har alltid vært på tilbudssiden og hjelpelige under hele prosessen. I tilfeldig rekkefølge; Morten Syrrist, Milna Mandusic, Odd R. Amundstad og Knut B. Bjelke.

Jeg vil også takke min hovedveileder, Vegard Nilsen. Uten hans uvurderlige tålmodighet, veiledning og moralsk støtte hadde ikke denne oppgaven vært mulig. Hans interesse for vannfaget har vært smittsomt med positivt fortegn.

Jeg vil utnytte anledningen til å takke Slangehulen(22), Drivhus1 og alle studievenner som har løftet studietilværelsen på Ås til nye høyder. Tataki-familien har også spilt en viktig rolle og fortjener ros. Det har vært en uforglemmelig reise.

I kjølvannet av koronakrisen vil jeg rekke en stor takk til samfunnsviktige organer som har stått på med iherdig innsats.

Til slutt vil undertegnede takke familien for oppveksten og de gode verdiene.

Ski, 02.06.2020

Thach Hoang Dang Nguyen

Sammendrag

Lekkasje av drikkevann er et vanlig problem i vannledningsnettverk, slik at VA-miljøet har sett på trykkforvaltning som et viktig bidrag i lekkasjereduksjon. Siden 1990 har det blitt vanlig å dimensjonere ledningsnett som tar høyde for forholdet mellom trykk og lekkasje. I dag regnes trykkforvaltning som en av de viktigste strategiene i kampen mot lekkasje-problematikk.

Denne oppgaven er casebasert og er gjort på vegne av Oslo Vann- og avløpsetaten. I dette caset er målsettingen å analysere reduksjonspotensialet i lekkasje ved bruk av en dynamisk mengderegulert ventil for en trykksone i Oslo. Caset framlegger har også fokusert på muligheter med permanentstyring for eksisterende ventil. For å kunne optimalisere styringsreglene i ventilen har caset kartlagt kritiske punkter i sonen. Ventilene har blitt innstilt for levere minstetrykket i det kritiske punktet på 20 mVS ved maksforbruk.

Modelleringsverktøyet, EPANET, har blitt benyttet for å simulere trykk-lekkasjeforholdet i ledningsnett. Caset har tatt hensyn til tre modeller med tilhørende lekkasjeeksponenter.

For den aktuelle trykksonen har det blitt observert et behov for trykkreduksjon.

Permanentstyring har et reduksjonspotensial i lekkasje på minst 18 % som tilsvarer 71 250 kroner i besparelse. Med mengderegulert ventil foreligger det en lekkasjereduksjon med 25 % og en besparelse i underkant av 100 000 kr. Den økonomiske vinningen er høyere for økende lekkasjeeksponent som vi bli belyst i oppgaven.

Abstract

Leakage of drinking water is a common problem in water supply networks, so the international water environment has seen pressure management as an important contribution in leakage reduction. In the 1990s people have started to use the relationship between pressure and take into account for designing further networks. Today, pressure management is considered to be one of the most important strategies in the fight against leakage problems.

This paper is a casebased study and has been done on behalf of the Oslo Water and Sewerage Agency. In this case, the objective is to analyze the reduction potential in leakage using a dynamic flow-modulated control valve for a pressure zone in Oslo. The case also focuses on opportunities for adjusting fixed setting for the existing pressure reducing valve. In order to optimize the control rules in the valves, the case has mapped critical points in the zone. The valves have been set to provide the minimum pressure at the critical point of 20 mVS at maximum consumption. The modeling tool, EPANET, has been used to simulate the pressure leakage ratio in the water supply network. This case has also taken into account three models with with associated leakage exponents.

The pressure zone has been observed to have high pressure and there's potential for pressure reduction. By lowering the fixed setting on the existing valve, the reduction potential in leakage is at least 18 %, which is equivalent to NOK 71 250 in savings. With flow-modulated control valve, the leakage reduction is 25% and a saving of just under NOK 100,000. The financial gain is higher for the increasing leakage exponent, as we highlight in the paper.

Innholdsfortegnelse

FORORD	I
SAMMENDRAG	III
ABSTRACT	IV
INNHOLDSFORTEGNELSE	VI
FIGURLISTE	IX
TABELLISTE	XI
ORDFORKLARING	XII
1. INNLEDNING	1
1.1 PROBLEMSTILLING	2
1.2 OPPGAVENS STRUKTUR OG OPPSETT	3
2. BAKGRUNN	4
2.1 VA-HYDRAULIKK	4
2.2 VANNTAP OG LEKKASJE – ET DEFINISJONSSPØRSMÅL	12
2.3 BRUDD- OG BAKGRUNNSLEKKASJE	12
2.4 FORBRUKS- OG LEKKASJEANDEL	14
2.5 SAMMENHENG MELLOM LEKKASJE OG TRYKK	17
2.6 TRYKKFORVALTNING	22
2.7 EGENSKAPER OG VALG AV TRYKKREDUKSJONSVENTILER (TRV).....	25
2.8 ERFARINGER FRA INTERNASJONALE STUDIER OM TRYKKSTYRING	29
3. METODE	31
CASEBESKRIVELSE	32
DEL 1: VURDERING AV DATAKVALITET OG STRATEGI	36
1.1 FORBRUKSDATA OG TRYKKMÅLINGENE FOR 270-SONE	36
1.2. MODELLEN FOR 270-SONE	36
DEL 2: KALIBRERING OG KLARGJØRING AV MODELL	37
2.1 MODELLVERKTØY	37
2.2 KONSTRUKSJON AV LEKKASJE-TRYKK FORHOLD I SONEN.....	38
2.3 BESTEMME LEKKASJEKONSTANTEN, K.....	38
2.4 BESTEMME LEKKASJE MED MODIFISERT MNF-METODEN	38
2.5 JUSTERING AV LEGALT NATTFORBRUK OG LEKKASJE I MODELLEN	39
2.6 JUSTERE MIDDELDØGNFORBRUKET I EPANET	40
DEL 3: MODELLSIMULERING OG FUNKSJONSTEST	41
3.1 BEREGNE LEKKASJEANDEL OG TILHØRENDE KOSTNAD.....	41
3.2 POTENSIELLE KRITISKE PUNKTER.....	42
3.3 INSTALLERE BERMAD 7PM OG BESTEMME VENTILINNSTILLING.....	42
3.4 UTFORDRINGER MED PUMPESTASJON.....	43
3.5 NØDVENDIG MODELLERINGSTEKNIKK	44
3.6 FUNKSJONSTESTER.....	44
4. RESULTAT	49
4.1 FORANALYSE	49

4.1.1 ANALYSERE AV OBSERVERT NATTFORBRUK MED BOKSDIAGRAM.....	49
4.1.2 OBSERVERT NATTFORBRUK GJENNOM ÅRET	50
4.1.3 FORHOLDET MELLOM VANNFØRING OG TRYKKTAP FOR VENTILEN BERMAD.....	51
4.1.4 AVVIK I DØGNFORBRUKET	52
4.1.5 IDENTIFISERE POTENSIELLE KRITISKE PUNKTER (KP) VED OBSERVERT TRYKKNIVÅ	52
4.1.6 GJENNOMGANG AV VENTILKURVE	53
4.2 TILSTANDSANALYSE	58
4.2.1 TRYKKBILDE I SONEN.....	58
4.2.2 TRYKKNIVÅ I HVER NODE	61
4.2.3 TIDSTEMPLET TRYKK FOR SONEN, KRITISK PUNKT (KP) OG NODE LENGST UNNA	63
4.2.4 TRYKKPROFIL OVER ET DØGN	64
4.2.5 REDUKSJONSPOTENSIALET I LEKKASJE VED MNF	65
4.2.6 TOTALFORBRUK OG LEKKASJEANDEL	67
4.2.7 LEKKASJEUTVIKLING OVER ET DØGN.....	69
DISKUSJON OG OPPSUMMERING AV TILSTANDSANALYSE.....	72
VURDERING AV OVERSKUDDSTRYKKET I SONEN OG REDUKSJONSPOTENSIAL	72
VURDERING AV ROBUSTHET OG DRIFTSSIKKER VANNLEVERANSE MED 65-TRV OG BERMAD	72
VURDERING AV REDUKSJONSPOTENSIAL I LEKKASJE MED VARIERENDE N1-VERDI.....	73
VURDERING AV BEGRENSENINGER OG SVAKHET MED MODELLEN	73
4.3 FUNKSJONSANALYSE	75
4.3.1 STIKKANALYSE – AVVIK I BRANNVANNKAPASITET MELLOM N1-VERDIER.....	75
4.3.2 FASE 1 – ENSIDIG VANNFORSYNING MED BRANNUTTAK	76
4.3.3 FASE 2 – ENSIDIG VANNFORSYNING MED BRANNUTTAK OG STENGTE LEDNINGER	81
4.3.4 FASE 3 -TOSIDIG VANNFORSYNING MED STENGTE LEDNINGER.....	85
DISKUSJON OG OPPSUMMERING AV FUNKSJONSANALYSE.....	91
FASE 1 – ENSIDIG VANNFORSYNING: BRANNUTTAK.....	91
FASE 2 – ENSIDIG VANNFORSYNING: BRANNVANNUTTAK MED STENGTE LEDNINGER	91
FASE 3 – TOSIDIG VANNFORSYNING: BRANNVANNUTTAK MED STENGTE LEDNINGER	92
VURDERING AV FRAMGANGSMÅTE I FUNKSJONSANALYSEN	93
SAMLET VURDERING AV VENTILER ETTER FUNKSJONSANALYSE	93
FORSLAG - MODIFISERING AV VENTILKURVEN	94
4.4 ØKONOMISK ANALYSE	97
4.4.1 LEKKASJEKOSTNAD PER KUBIKKMETER.....	97
4.4.2 DRIFTSKOSTNADER FOR VENTIL.....	98
4.4.3 LEKKASJEVOLUM PER METER LEDNING OG PERSON	98
4.4.4 BESPART LEKKASJEKOSTNAD I KRONER.....	99
DISKUSJON AV ØKONOMISK ANALYSE	101
BESPARING MED PERMANENT ENDRING - 65-TRV	101
BESPARING MED MENGDEREGULERT VENTIL – BERMAD	101
5. AVSLUTNING.....	103
5.1 KONKLUSJON	103
5.2 SELVREFLEKSJON OG ETTERTANKE.....	104
5.3 VEIEN VIDERE	104
VEDLEGG	108
AVVIK FRA DØGNFORBRUK, Q_{REF} , UNDER KALIBRERING	108
TIMESBASERT NATTFORBRUK	109
TRYKKBILDE VED N1 = 1,0.....	110
TRYKKBILDE VED N1 = 1,5.....	110

REDUKSJON I TOTALFORBRUK I LØPET AV DØGNET	110
RØRSAMMENSETNING FOR SONE 270	111
STIPULERT FORBRUK OG ANSLÅTT LEKKASJE I 270-SONEN.....	111
PUMPEKARAKTERSTIKK FOR VP10	112
VENTILBESKRIVELSE BERMAD 7PM.....	113

Figurliste

FIGUR 1: PRINSIPPET OM KONTINUITETSLIKNINGEN (ØDEGAARD ET AL., 2014, s.66).....	5
FIGUR 2: PRINSIPPSKISSE AV BERNOULLIS-LIKNING FOR ULIKE TVERRSNITT. INSPIRERT AV (ØDEGAARD ET AL., 2014, s.75).....	9
FIGUR 3: SKJEMATISK FRAMSTILLING AV HGL I ET PUMPESYSTEM (WALSKI ET AL., 2003, s.47)	10
FIGUR 4: STANDARD VANNTAPBETRAKTNING AV IWA (THORNTON ET AL., 2008, s.76).....	12
FIGUR 5: LEKKASJE I VANNLEDNING (THORNTON ET AL., 2008, s.20)	13
FIGUR 6: LEKKASJEFORLØPET ER AVHENGIG AV TRE FAKTORER OG LEKKASJETYPE. X-AKSE: TID, Y-AKSE: VOLUMSTRØM (FARLEY & TROW, 2003, s.74).....	14
FIGUR 7: ILLUSTRASJON PÅ SOM VISER SAMMENHENG MELLOM VARIERENDE DAGSFORBRUK, MINSTE NATTFORBRUK, LEKKASJE OG TRYKK (ZIEGLER, 2011)	15
FIGUR 8: FORHOLD MELLOM KOSTNADER KNYTTET TIL LEKKASJESØK/REPARASJON MED LEKKASJEMENGDE (FARLEY & TROW, 2003, s.56)	17
FIGUR 9: OBSERVERT N1-VERDIER PÅ FELT- OG LABORATORIUMSARBEID (THORNTON ET AL., 2008, s.142)	19
FIGUR 10: SAMMENHENG MELLOM N1-VERDIER OG INFRASTRUKTUR LEKKASJEINDEKS GITT LEDNINGSMATERIALE (LAMBERT, 2001)	19
FIGUR 11: GENERELL FORHOLD MELLOM TRYKK- LEKKASJE VED BESTEMTE N1-VERDIER (FARLEY & TROW, 2003)	21
FIGUR 12: SAMMENHENG MELLOM FAST- OG VARIABEL LEKKASJEOMRÅDET VED FAVAD-KONSEPT	22
FIGUR 13: VISUELT BILDE AV TRYKKPÅVIRKNING HOS ABONNENT. (THORNTON ET AL., 2008, s.25).....	25
FIGUR 14: PRINSIPPSKISSE AV TRV (WALSKI ET AL., 2003, s.40).....	26
FIGUR 15: SAMMENHENG MELLOM TRYKKLINJE OG FORBRUK VED BRUK AV TRV (ØDEGAARD ET AL., 2014, s.244).....	26
FIGUR 16: VENTIL I ET FORSYNINGSOMRÅDE MED KRITISK PUNKT. INSPIRERT ILLUSTRASJON FRA (MCKENZIE & WEGELIN, 2009). A) KONVENJONELL B) TIDSSTYRING C) MENGDESTYRT.	29
FIGUR 17: OVERORDNET STRATEGI FOR CASEGJENNOMFØRING	31
FIGUR 18:OVERSKUDDSTRYKK I OSLO-REGIONEN. (BOSNJAKOVIC, 2018).....	33
FIGUR 19: OVERSIKT OVER INNDATA TIL MODELLEN	34
FIGUR 20: 270-SONE SOM VISER HØYDEFORSKJELL OG RØRDIAMETER	35
FIGUR 21: EKSEMPEL PÅ VENTILKURVE I EPANET	43
FIGUR 22: A) PUMPAS LØFTEHØYDE GIR HGL B) VANNspeil SØRGER FOR HGL. MODIFISERT VERSJON AV (WALSKI ET AL., 2003, s.100).....	44
FIGUR 23: KART OVER HVOR SCENARIOENE BEFINNER SEG I SONEN	47
FIGUR 24: STYRINGSREGLER FOR VP10 FRA EPANET	48
FIGUR 25: BOKSDIAGRAM AV OBSERVERT NATTFORBRUK FOR 2018 & 2019	50
FIGUR 26: OBSERVERT NATTFORBRUK GJENNOM ÅRET.....	51
FIGUR 27: SAMMENHENG MELLOM TRYKKFALL OG UTLØPSVANNFØRING FOR VENTILEN	51
FIGUR 28: AVVIK I DØGNFORBRUK.....	52
FIGUR 29: UTVALG AV KP'ER GJENNOM DØGNET.....	53
FIGUR 30: TRYKK I KRITISK PUNKT MED TOTALFORBRUKET I SONEN.....	54
FIGUR 31: TRYKK [MVS] I KP VED TRE VENTILKURVER	56
FIGUR 32: ENDELIG VENTILKURVE I BERMAD	57
FIGUR 33: TRYKKBILDE MED 90-TRV – 07:00	59
FIGUR 34: TRYKKBILDE MED 65-TRV – 07:00	59
FIGUR 35: TRYKKBILDE MED BERMAD - 07:00.....	60
FIGUR 36: TRYKKBILDE MED 90-TRV - 04:00	60
FIGUR 37: TRYKKBILDE MED 65-TRV - 04:00	61
FIGUR 38: TRYKKBILDE MED BERMAD - 04:00.....	61
FIGUR 39: TRYKKNIVÅ I NODENE MED UKORRIGERT FORBRUK VED KLOKKEN 07:00	62
FIGUR 40: TRYKKNIVÅ I NODENE MED UKORRIGERT FORBRUK VED KLOKKEN 04:00	63
FIGUR 41: GJENNOMSNIITTLIG TRYKK I SONEN FOR HVER TIME OVER ET DØGN.....	64
FIGUR 42: TRYKK I KRITISK PUNKT (KP) FOR HVER TIME OVER ET DØGN	65
FIGUR 43: 90-TRV vs. 65-TRV VED NORMALSITUASJON OG N1 = 0,5	66
FIGUR 44: 90TRV vs. 65-TRV VED NORMALSITUASJON OG N1 = 0,5	66

FIGUR 45: SAMMENHENG MELLOM TOTALFORBRUK OG LEKKASJE VED $N1 = 1.0$	68
FIGUR 46: SAMMENHENG MELLOM TOTALFORBRUK LEKKASJE VED $N1 = 1.5$	69
FIGUR 47: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK MELLOM 10-20 mVS VED NATTESTID (T.V) OG ETTERMIDDAG (T.H) FOR BERMAD.....	78
FIGUR 48: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK MELLOM 10-20 mVS VED NATTESTID (T.V) OG ETTERMIDDAG (T.H) FOR BERMAD.....	79
FIGUR 49: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK MELLOM 10-20 mVS PÅ ETTERMIDDAG FOR 65-TRV	79
FIGUR 50: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK MELLOM 10-20 mVS VED NATTESTID (T.V) OG ETTERMIDDAG (T.H) FOR BERMAD.....	81
FIGUR 51: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK MELLOM 10-20 mVS VED NATTESTID (T.V) OG ETTERMIDDAG (T.H) FOR 65-TRV.....	81
FIGUR 52: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK UNDER 10 mVS VED BRANN I KRITISK PUNKT MED STENGT LEDNING PÅ ETTERMIDDAGSTID. 65-TRV (T.V), BERMAD (T.H).....	82
FIGUR 53: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK UNDER 10 mVS VED BRANN I SMÅHUSBEBYGGELSE MED STENGT LEDNING PÅ ETTERMIDDAGSTID. 65-TRV (T.V), BERMAD (T.H).....	83
FIGUR 54: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK UNDER 10 mVS VED BRUK AV 90-TRV.....	84
FIGUR 55: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK UNDER 10 mVS VED BRUK AV 65-TRV.....	84
FIGUR 56: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTTRYKK UNDER 10 mVS VED BRUK AV BERMAD.....	85
FIGUR 57: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTRYKK MELLOM 10-20 mVS VED BRUK AV BERMAD.....	86
FIGUR 58: DISTRIBUTUERT VANNFØRING FRA RK55 UTEN STENGING.....	87
FIGUR 59: DISTRIBUTUERT VANNFØRING FRA RK55 VED SCENARIO 3.....	87
FIGUR 60: NODER (MARKERT RØDT) MED RESTRYKK MELLOM 10-20 mVS VED SCENARIO 3 OG BRUK AV BERMAD.	88
FIGUR 61: BERMAD: SCENARIO 2 (T.V) ER NODENE 15-20 mVS. SCENARIO 3 (T.H) ER NODENE 18-20 mVS.	89
FIGUR 62: DISTRIBUTUERT VANNFØRING FRA RK55 VED BRANN I LEILIGHETSOMRÅDE MED TOSIDIG FORSYNING....	89
FIGUR 63: DISTRIBUTUERT VANNFØRING FRA RK55 VED BRANN OG SCENARIO 3 I LEILIGHETSOMRÅDE MED TOSIDIG FORSYNING	90
FIGUR 64: TOTALFORBRUK OG TRYKK I KRITISK PUNKT FØR BRANN VED TO VENTILKURVER.	95
FIGUR 65: TOTALFORBRUK OG TRYKK I KRITISKPUNKT ETTER BRANN VED TO VENTILKURVER.	95
FIGUR 66: FORESLÅTT TRYKKFALLSFORHOLD I VENTIL	96

Tabelliste

TABELL 1: EKSEMPLER PÅ RUHETSVERDIER FOR LEDNINGSMATERIALE (ØDEGAARD ET AL., 2014, S.71)	7
TABELL 2: POTENSIELLE KP'ER	52
TABELL 3: TRYKKFALL VED LAVT FORBRUK	55
TABELL 4: TRYKKFALL VED HØYT FORBRUK	55
TABELL 5: TRYKKVERDIER [MVS] FOR UTVALGTE TIDSPUNKTER	63
TABELL 6: REDUSERT TOTALFORBRUK (%) FOR GITT TIDSPERIODER I DØGNET OG ANGITTE N1-VERDIER	70
TABELL 7: LEKKASJEBEREGNING [L/S] FOR VENTILER MED TILHØRENDE N1-VERDI	71
TABELL 8: TRYKK[MVS] I KP VED BRANNUTTAK PÅ 20 L/S.	75
TABELL 9: MINSTE BRANNVANNKAPASITET [L/S] GITT RESTTRYKK 10 MVS I KP	76
TABELL 10: NODER MED RESTTRYKK UNDER 20 MVS VED BRANN. $X > 46$ MVS OG $Z > 20$ MVS	77
TABELL 11: NODER MED RESTRYKK UNDER 15 MVS VED BRANN	78
TABELL 12: NODER MED RESTTRYKK UNDER 11 MVS OG BRANN-NODE VED BRANN	80
TABELL 13: NODER MED RESTRYKK UNDER 10 MVS VED BRANN I KP MED STENGT LEDNING (SCENARIO 1). 32 MVS OG $Z > 10$ MVS	82
TABELL 14: NODER MED RESTRYKK UNDER 10 MVS VED BRANN I SMÅHUSBEBYGGELSE MED STENGT LEDNING (SCENARIO 1). $X > 35$ OG $Z > 10$	83
TABELL 15: RESTTRYKK [MVS] FOR KRITISKE PUNKT MED TOSIDIG VANNFORSYNING	86
TABELL 16: RESTTRYKK [MVS] FOR BRANN-NODE MED TOSIDIG VANNFORSYNING	88
TABELL 17: SAMLET VURDERING AV VENTILER ETTER FUNKSJONSANALYSE	94
TABELL 18: BEREGNING AV LEKKASJEKOSTNAD PER M ³	97
TABELL 19: DRIFTSKOSTNAD KNYTTET TIL VENTIL	98
TABELL 20: LEKKASJE PER PERS OG LENGDE FOR 65-TRV	98
TABELL 21: LEKKASJE PER PERSON OG LENGDE FOR BERMAD	99
TABELL 22: BESPART LEKKASJEKOSTNAD VED N1 = 0.5	99
TABELL 23: BESPART LEKKASJEKOSTNAD VED N1 = 1.0	100
TABELL 24: BESPART LEKKASJEKOSTNAD VED N1 = 1.5	100

Ordforklaring

65-TRV = Konvensjonell trykkreduksjonsventil med 65 mVS nedstrøms

90-TRV = Konvensjonell trykkreduksjonsventil med 90 mVS nedstrøms (opprinnelig ventil)

Base demand = Nominell/gjennomsnitt forbruk i en node

CARL = Current annual real losses

Check valve = Tilbakeslagsventil

DDA = Demand driven analysis model

Demand multiplier = Forbruksmultiplikator

EPANET = Offentlig modelleringsverktøy utviklet av EPA

EPA = Environmental Protection Agency

FAVAD = Fixed and variable area discharges

Fryste verdi = På engelsk: Data spikes

GPV = General pressure valve

ILI = Infrastructure leakage index

INP-fil = Filtype

IWA = International Water Association

KP = Kritisk punkt

PDA = Pressure driven analysis model

Mike Urban = Modelleringsverktøy innen vanndistribusjon

NSGA-II = Non-dominated sorting genetic algorithm II

PLS-program = Programmerbar logisk styring

SCADA = Supervisory control and data acquisition

UARL = Unavoidable annual real losses

VAV = Vann- og avløpsetaten

VDI = Seksjon vandistribusjon i VAV

TEK17 = Byggeteknisk forskrift

TDH = Total dynamisk høyde

TRV = Trykkreduksjonsventil

1. Innledning

I verdens sammenheng er årlig estimert vanntap på 48,7 milliarder kubikkmeter rent vann som går til spille (Thornton et al., 2008, s.5). Fokus på å redusere vanntapet er viktigere enn noen gang er et viktig samfunnstema på internasjonalt nivå. Gjennom FNs universelle bærekraftsmål, stilles det høyere krav til økt forsvarlig bruk og sikring av bærekraftig vannforvaltning (FN, 2020, s.585). Fra vannreservoaret og forsyningsområder er vanntapet antatt størst i vanntransporten (68%) etterfulgt av feilmåling (15%) (Farley et al., 2001). Utfordringene til vanntap har utfordret det internasjonale VA-miljøet til å tenke nytt innen aktiv lekkasjekontroll, reparasjon av lekkasjer, trykkforvaltning, aktiv rehabilitering og forvaltning. Disse fire hovedstrategiene er grunnpilarene for lekkasjereduksjon og kontroll av vanntap (Farley & Trow, 2003).

Helserisiko er en motivasjonsfaktor for å redusere vanntap. Avløps- og vannledninger ligger som regel i samme grøft og dette sine ulemper. Det er fare for innsug av avløpsvann grunnet undertrykk i vannledninger, noe som kan føre til at drikkevannet blir forurenset og forringet lokalt. Nærmere 30 % av lekkasjevannet har en tendens til å renne inn i trykkløse avløpsledninger via utette skjøter og/eller via grunnvann i Oslo kommune (Oslo VAV, 2015b). Sammenlignet med Finland og Danmark har Norge 2-3 ganger mer fremmedvann på renseanlegget. (Lindholm. O. G. et al., 2012). Redusert lekkasjeomfang vil avlaste avløpsledningene og renseanlegget, og samtidig bidra til mer kontroll over fremmeds kvalitet og mengde.

Det er dessuten knyttet kostnader til produksjon og distribuering av drikkevann i form av kjemikalier og energibruk. På nasjonalt nivå var lekkasjenivået estimert til 29,8 % i 2018. Dette har en kostnadsramme på 354 millioner NOK og tilsvarer 703 388 332 kubikkmeter vann. Kostnadsposten er knyttet til vannforsyningen og innlekket lekkasjevann på avløpsanleggene på forholdsvis 273 og 81 millioner NOK (Norsk Vann, 2019). Påløpende kostnader til vedlikehold og reparasjon er direkte konsekvens av hyppige lekkasjeforekomster i ledningsnettet.

I mange tilfeller vil det være mer lønnsomt å la lekkasjen være som den er da marginalkostnaden er lavere enn å utføre lekkasesøk, utgraving og tette lekkasje (Ødegaard et al., 2014, s.155). I kampen mot vannlekkasje har trykkforvaltning blitt anerkjent i VA-miljøet og anses som et viktig bidrag. I skrivende stund er trykkforvaltning den mest effektive og lønnsomme strategien for lekkasjereduksjon (Thornton et al., 2008, s.43). Det er viktig å

poengtere at metoden alene ikke eliminerer lekkasjen, men er et verktøy som det i skrivende stund forskes mye på. Utenom trykkforvaltning vil kun erstatning og infrastrukturforbedring rundt vannledningene begrense bakgrunnslekkasjen (Foundation, 2007).

Gjennom de siste tiårene har det blitt utviklet mer avanserte trykkreduksjonsventiler med mulighet for ekstern styring. Ventilene kan i større grad styres av vannforbruk i ledningsnett eller tidsstyres, alt etter behov, kompetanse og økonomi. Avanserte algoritmer kan brukes for å bestemme optimal plassering og antall trykkreduksjonsventiler i nettet. Ikke alle forsyningsnett vil ha nytte av en slik teknologisk tilnærming. En enkel trykkreduksjonsventil med konstant nedstrøms trykk vil kanskje ha mindre virkning, men veier opp med at den både er billig og effektiv. Nøkkelen ligger å finne balansegangen mellom enkel og avansert styring parallelt med samfunnsøkonomisk vinning. Dette leder oss til problemstillingen i neste avsnitt.

1.1 Problemstilling

Denne oppgaven analyserer en trykksone i Oslo med over syv tusen innbyggere. I dag reguleres trykket i sonen primært av en tradisjonell trykkreduksjonsventil og en pumpestasjon som sørger for statisk totalhøyde på 270. Pumpen er styrt med frekvensomformer. Forfatter har fått i oppdrag av Oslo VAV å se på muligheten for trykknedsenking med ønske om å redusere lekkasjeomfanget. Problemstillingen for oppgaven blir som følger:

Hvilke potensiale for lekkasjereduksjon og tilhørende økonomiske vinning ligger ved bruk av

Alternativ 1: Dynamisk styrt trykkreduksjonsventil

Alternativ 2: Opprinnelig ventil med redusert leveringstrykk

i 270-sonen?

De nevnte forslagene skal brukes for å svare på delspørsmålene:

- a. Hvor mye kan lekkasjevolumet reduseres sammenlignet med opprinnelig trykkreduksjonsventil?
- b. Hvor mye kan vi senke trykket uten at det går ut over servicebruken hos den kritiske abonnenten (kritisk forbruk)?
- c. Hvordan vil elementer ute av drift påvirke trykket i sonen med ventilene?
- d. Hvordan vil effekten av brann påvirke trykksituasjonen med ventilene? Hvilke endringer kan bli gjort for å motvirke at abonnentene får mangelfull trykk?

- e. Hvilke økonomiske gevinster ligger bak ventilalternativene?

1.2 Oppgavens struktur og oppsett

Oppgaven er bygget opp slik at leseren på en hensiktsmessig måte skal fatte informasjonen gradvis. Oppgaven er hovedsakelig delt inn i fire deler.

Kapittel 2 skal ta for seg problematikken rundt temaet samtidig gjøre kort rede for hvordan det internasjonale VA-miljøet har møtt disse utfordringene. Relevant teori og litteratur fremstilles for å styrke forståelsen og danne et overordnet bilde for leseren.

Kapittel 3 omhandler casestudiet og metode. Her vil det presisere nødvendige forutsetninger og avgrensninger som gjør det mulig å besvare oppgaven best mulig. Hvilke veivalg som har blitt tatt gjennom oppgaven blir redegjort i metoden.

Kapittel 4 presenterer resultatene. Metode og modellen blir vurdert opp mot resultat og leseren blir veiledet gjennom prosessen. Kapittelet ender med å sammenstille og drøfte de viktigste momentene for å besvare problemstillingen.

Kapittel 5 vil trekke en konklusjon og komme med anbefalinger vedrørende problemstillingen. Avslutningsvis vil forfatter komme med innspill til videre arbeid samtidig gi en personlig mening om læringsutbytte og utfordringer knyttet til oppgaven.

2. Bakgrunn

2.1 VA-hydraulikk

I denne delen vil grunnleggende teori innen VA-teknikk som omhandler hydraulikken i rørstrømning og ledningsnett bli presentert. Sentrale begreper og formler vil supplere teorien.

2.1.1 Volumstrøm

Volumstrøm forteller hvor mye vann som strømmer gjennom en rørledning, ventil eller pumpe pr tidsenhet. Det er vanlig å oppgi volumstrøm, Q , i liter per sekund [l/s] eller kubikkmeter pr sekund [m³/s].

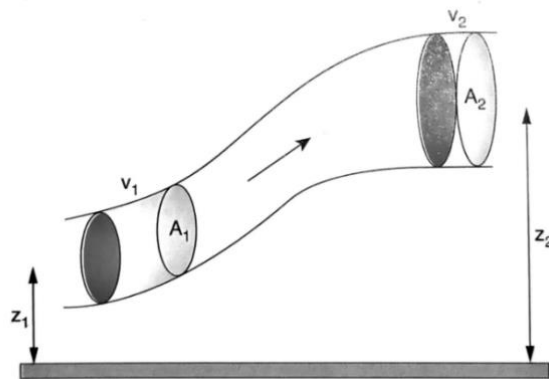
2.1.2 Kontinuitetslikningen

Dersom vannføringens tetthet er konstant gjennom en rørledning kalles strømmingen for inkompressibel. Volumstrømmen er dermed lik i tverrsnitt 1 som i tverrsnitt 2 i ledningen (Ødegaard et al., 2014, s.66):

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad [1]$$

Hvor:

$A_{1/2}$	Tverrsnittsareal i rør[m ²]
$v_{1/2}$	Midlere vannhastighet[m/s]
Q	Vannføring[m ³ /s]



Figur 1: Prinsippet om kontinuitetslikningen (Ødegaard et al., 2014, s.66)

2.1.3 Trykk

I VA-sammenheng vil vanntrykket variere med høyden. For et vannmagasin der vannet er i ro, er den hydrostatiske trykket (P) produktet av høyde av vannsøylen (H) og vannets spesifikke vekt (ρg). Høyden kalles også for trykkhøyde og måles i meter vannsøyle (mVS) eller bar. I praksis tilsvarer 10 mVS lik 1 bar (teoretisk verdi: 0,981 bar). Formelen for trykkhøyde (Walski et al., 2003, s.24):

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad [2]$$

Trykket kan bli målt fra forskjellige referansepunkt. Absolutt trykk er målt til 0 i vakuum og kan ikke være negativt. Relativt trykk er målt 0 forhold til atmosfærisk trykk (1 atm.) og vil ha negativ trykk dersom trykket er mindre enn dette. I VA-teknikk er det vanlig å bruke relativt trykk da det ikke tar hensyn til atmosfærisk trykk og gir en mer intuitiv forståelse (Walski et al., 2003, s.26):

$$P_{absolutt} = P_{relativt} + P_{atmosfærisk} \quad [3]$$

2.1.4 Strømningstype

Det er tre strømningstyper som skilles fra hverandre ved hjelp av Reynoldstall, Re :

1. Laminær strømning: $Re < 2000$

2. Faseovergangen: $2000 < Re < 4000$

2. Turbulens strømning: $Re > 4000$

Vannets viskositet endrer seg med temperaturen. Det er vanlig å anta vannets dynamisk viskositet, $\mu = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$, ved 20 Celsius grader. Hastighetsprofilen for strømningsregimene er ikke uniform. Laminære strømninger har parabelprofil mens turbulent strømning er sporadisk. Reynoldstall defineres som (Walski et al., 2003, s.28):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad [4]$$

Hvor:

Re	Reynoldstall. Dimensjonsløs.
D	Rørdiameter[m]
v	Midlere vannhastighet[m/s]
ρ	Vanns tetthet[kg/m ³]
μ	Vannets dynamiske viskositet[kg/(m·s)]

2.1.5 Friksjonstap i ledninger

Under vanntransporten i ledningen vil det forekomme tap i form av friksjon mellom vanne og rørveggen. Friksjonen skaper varmeenergi langs ledningen. Trykklinjen synker som følge av friksjonstap. Det finnes tre måter å beregne falltapet (Walski et al., 2003, s.34) :

1. Hazen-Williams likning (H-W): Ofte brukt i USA og kan ikke benyttes for andre væsker enn vann.
2. Chezy-Mannings likning (C-M): Ofte brukt i beregning for åpne kanaler.
3. Darcy-Weisbachs likning (D-W): Mest teoretisk korrekt kan anvende for alle typer væsker. I Norge er D-W den vanligste måten å beregne trykktap på:

$$h_f = f \frac{l v^2}{D 2g} \quad [5]$$

Hvor:

h_f	Friksjonstap[mVS]
-------	-------------------

f	Friksjonsfaktor. Dimensjonsløs.
l	Rørlengde[m]
D	Rørdiameter[m]
v	Midlere vannhastighet[m/s]
g	Tyngdens akselerasjon, gitt 9,81[m/s ²]

2.1.6 Rørruhet

Rørruheten er avhengig av ledningsmaterialet og tilstanden til ledningen etter bruk.

Friksjonsfaktor, f, kan for turbulent strømming avleses på et Moody-diagram når relativ ruhet og Reynoldstall er kjent. Ved laminær strømming kan friksjonsfaktoren uttrykkes som (Ødegaard et al., 2014, s.70):

$$f = \frac{64}{Re} \quad [6]$$

Den teoretiske ruheten har en tendens til å fravike det faktiske forholdet i ledningsnett. Det er anbefalt å gjøre lokale undersøker på aktuelle ledninger før en velger riktig friksjonsfaktor.

Tabell 1: Eksempler på ruhetsverdier for ledningsmateriale (Ødegaard et al., 2014, s.71)

Ledningsmateriale	Teoretisk ruhet (mm)	Praktiske verdier på enkeltledninger (mm)
Plastrør (PVC, PE, etc.)	0.002 – 0.007	0.1 -0.4
Betongrør	0.3 – 1.0	1.0
Nye støpejernsrør med betongforing	0.3	0.5
Gamle rustne støpejernsrør	1.5 -2.5	1.5 -2.5

2.1.7 Singulærtap

Det kan oppstå singulærtap når vannføringen strømmer gjennom ventiler, bend og pumpe.

Singulærtapskoeffisienten, k_s , korrigerer andel tap av hastighetshøyden. Som regel ser en bort

fra singulærtap da friksjonstapet er betydelig større. Rørsystemer med mye bend eller innvikla pumpestasjoner bør inkludere singulærtap i dimensjoneringen. Singulærtap defineres som: (Ødegaard et al., 2014, s.74)

$$h_s = k_s \frac{v^2}{2g} \quad [7]$$

2.1.8 Energibevaring - Bernoullis likning

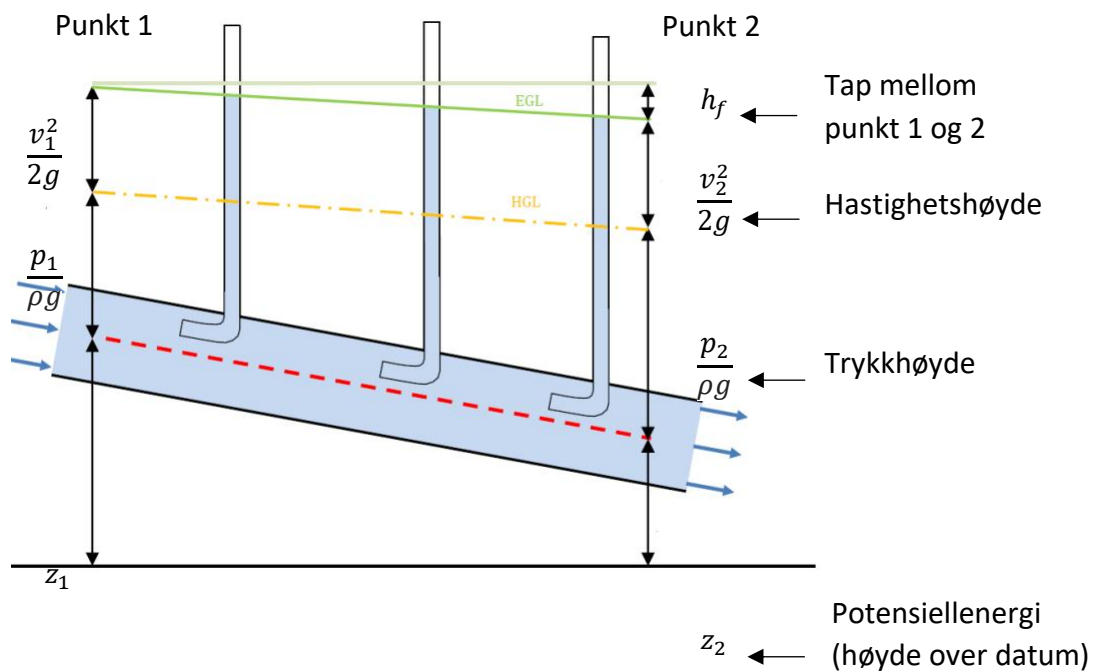
I rørstrømning finnes det fire energiformer; varme (friksjonstap), potensiell-, kinetisk- og trykkenergi.. Hastighetshøyden forskjellen mellom energilinjen (EGL) og trykklinjen (HGL) som er parallelle ved uniform strømning. I hydraulisk dimensjonering tas det utgangspunktet i HGL framfor EGL da trykkhøyden er betydelig i større enn hastighetshøyden (Trifunovi, 2015, s.62). Figur 2 vises tre vertikale pitotrør som illustrerer EGL langs ledningen. HGL viser trykklinjen. I prinsippet er energien bevart uavhengig av vannretningen.

Energibevaringen kan uttrykke sammen med Bernoullis likning ved (Ødegaard et al., 2014, s.75):

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad [8]$$

$$HGL = \frac{p}{\rho g} + z \quad [9]$$

$$EGL = \frac{P}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g} \quad [10]$$



Datum, $z = 0$

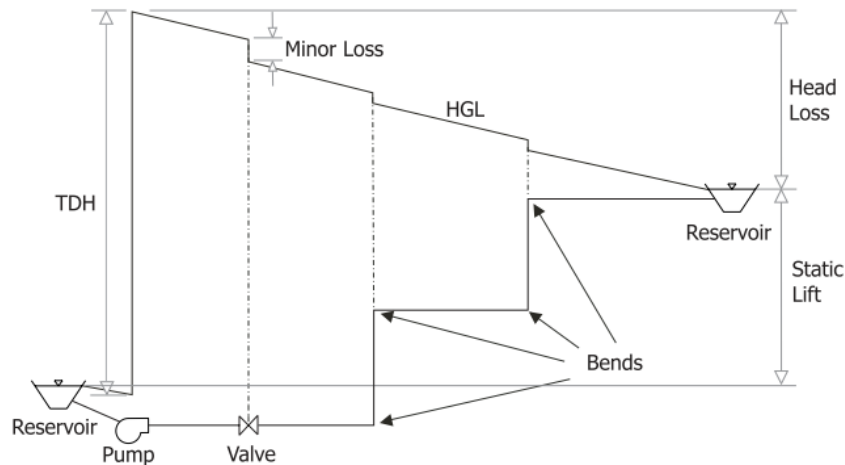
Figur 2: Prinsippskisse av Bernoullis-likning for ulike tverrsnitt. Inspirert av (Ødegaard et al., 2014, s.75)

2.1.9 Pumpe

Funksjonen til en pumpe tilføre vannmassen energi for å overkomme friksjons- og singulærtap, samt statisk løftehøyde. I VA-teknikk er dette snakk om pumpens statiske løftehøyde (H_t) og er uttrykt (Ødegaard et al., 2014, s.256):

$$H_t = h_p + h_f + h_s \quad [11]$$

Figur 3 viser at pumpen sørger for en total dynamisk løftehøyde (TDH) om systemet krever. TDH skal både overvinne høydeforskjellen og friksjonstapene i ledningen. Gjennom systemet avtar HGL som følge av friksjonstap.



Figur 3: Skjematisk framstilling av HGL i et pumpesystem (Walski et al., 2003, s.47)

Pumpekarakterstikk/pumpekurve beskriver forholdet mellom pumpens løftehøyde som funksjon av tilført vannmengde. Kurven er ikke-lineær og har en avtagende karakteristikk. Dette gjelder spesielt sentrifugalpumper som er den vanligste pumpetypen. Desto høyere vannmengde som strømmer gjennom pumpen, desto lavere blir løftehøyden pumpen kan levere.

Pumpekurven gjelder kun for en bestemt omdreiningshastighet. Ved null vannføring, $Q = 0$, vil pumpe ha løfthøyde h_0 . Løftehøyden er uttrykt som (Walski et al., 2003, s.44):

$$h_p = h_0 - Q^2 \quad [12]$$

Omdreiningshastigheten eller turtall, n , er et mål på løpehjulets omdreininger per tidsenhet. Det er vanlig å oppgi antall omdreininger per minutt. Fra affinitetsloven er turtallet proporsjonal med mengdevann pumpen leverer. Løftehøyden er proporsjonal med turtallet i annen potens. Dette forholdet anvendes for å bestemme pumpekurver med varierende turtall. Affinitetslovene for pumpene blir (Walski et al., 2003, s.44):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad , \quad \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad [13]$$

Det finnes mange typer pumper og måter å styre på. Vannføringen kan styre vha. stengeventil, men dette er lite energieffektivt og fare for trykkstøt ved rask lukking/åpning. I dag er det vanlig med elektriske frekvensomformer for turtallstyre pumpene. En slik reguleringsmetode

sørger for en jevnere vannføring da pumpen starter og stopper gradvis (Ødegaard et al., 2014, s.258).

2.1.10 Hydraulikk i ledningsnett

I et ledningsnett vil vannmassen verken bli skapt eller ødelagt. Den transporterte vannmassen er lik både før og etter den etterlater en ledning. Hvis en ser bort fra lekkasje vil den samlede vannmassen (Q_i) kun bli forbrukt i samlingspunkt/node (U) i nettet. Dette er prinsippet bak massebevaring (Walski et al., 2003, s.49):

$$\sum_{\text{ledninger}} Q_i - U = 0 \quad [14]$$

Energibevaringen er gitt også i ledningsnett. Fullstendig Bernoullis likning som inkluderer pumpe og singulærtap (Walski et al., 2003, s.50):

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_p = \frac{P_2}{\rho g} + z_3 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f + h_s \quad [15]$$

2.2 Vanntap og lekkasje – et definisjonsspørsmål

Den internasjonale vannforeningen, IWA, har utarbeidet en standardisert mal for kvantifisering av vannbalansen. Hovedfokuset er å kartlegge samt identifisere vannpostene fra et vannmagasin forsyningsområde. Vannbalansen deles gjerne opp i to kategorier; virkelig vanntap og legalt forbruk. Vanntap er summen av «tilsynelatende tap» og virkelig tap. Det førstnevnte er knyttet til illegalt forbruk og vannmålingsfeil hos abonnentene. Vanntap som følge av utlekking i vandistribusjonsnettet betegnes som virkelig tap eller lekkasje. Lekkasjeomfanget varierer med sammensetning av egenskapene til infrastrukturen og ledningsnettet.. I mange tilfeller er unødvendig vannforbruk hos abonnenten betrakte som vanntap.



Figur 4: Standard vanntapbetraktning av IWA (Thornton et al., 2008, s.76)

2.3 Brudd- og bakgrunnslekkasje

Individuelle lekkasjer med lav utstrømningsmengde er vanskelig å oppdage ved bruk av lydsensor som lekkasjesøk. Den type bakgrunnslekkasje er kontinuerlig er som oftest det største bidraget i total lekkasjetap (Thornton et al., 2008). Bakgrunnslekkasje kan betraktes som unngåelig vanntap og har en tendens til å øke desto eldre ledningsnettet er. Det er spesielt lekkasje som følge av små men mange korrosjon/tærehull i støpejernsrør som er karakteristisk med bakgrunnslekkasje. Vannledninger med elastiske egenskaper har noe lavere lydnivå sammenlignet med faste vannrør. Bakgrunnslekkasje hos plastrør har derfor en tendens til å være høyere enn antatt (Farley & Trow, 2003 s.71). Det er kun ved rørsifting at man får bukt med denne type lekkasje. Dette arbeidet er komplisert og krever samarbeid med flere etater/aktører. Det er ikke minst tids- og kostnadsintensiv, slik at man har sett på muligheter om trykknedsenking. Figur 5 viser andre typer lekkasje som er vanlig på vannledning.

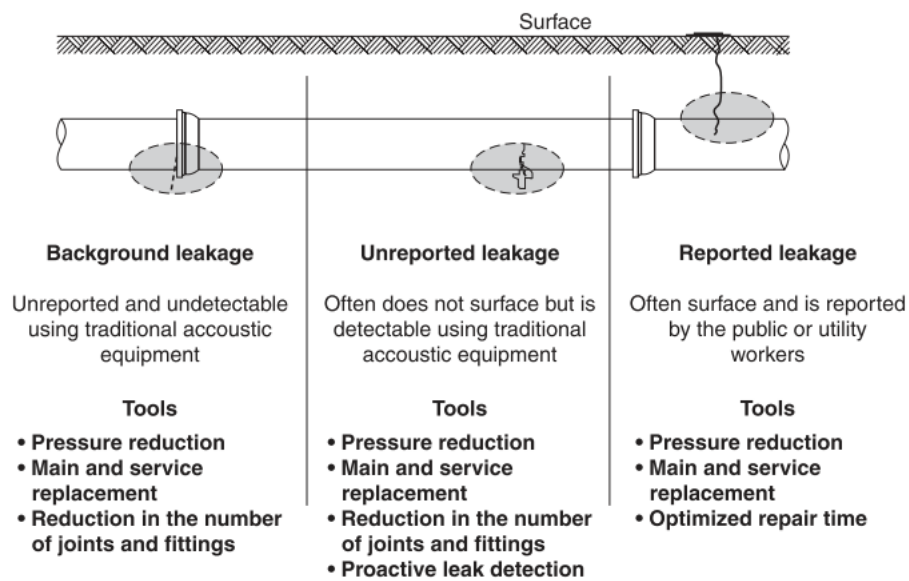
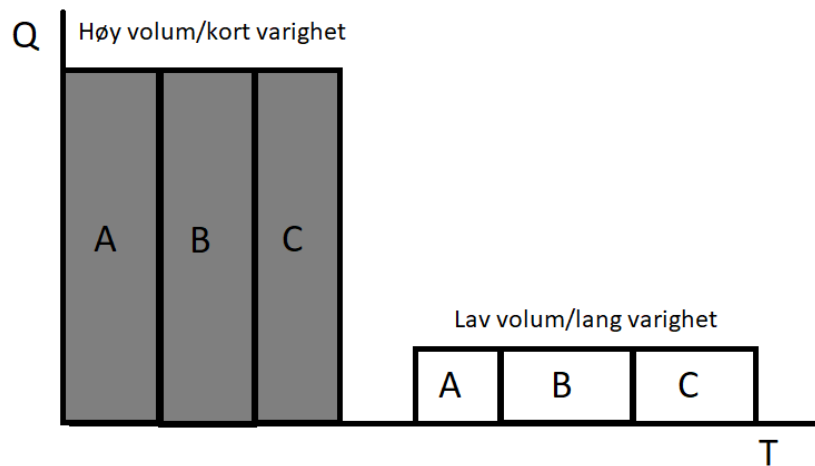


FIGURE 3.1 Components of real losses and tools for intervention. (Source: Ref. 2.)

Figur 5: Lekkasje i vannledning (Thornton et al., 2008, s.20)

Brudd i ledningen kan forekomme ved uheldig utgraving, feil bruk av materiale, foreldet rør og/eller høyt driftstrykk. Studier viser i eksempelvis Australia, New Zealand og Brazil at lekkasjefrekvensen (spesielt brudd) foregår hyppigere desto høyere overflødig trykk i systemet (Lambert, 2001).

Respons- og repareringstiden er avgjørende for å redusere lekkasje- og skadeomfanget. Bruddlekkasjer er enten rapportert inn fra abonnenten som opplever lavere leveringstrykk blitt oppdaget av datasystemer. Slike brudd har som regel høyere prioriteringsgrad da det direkte påvirker kapasiteten til vannlevering hos forbrukerne, topografien og bybilde. Da brudd er normalt lettere å oppdage og raskt håndtert, vil varigheten av lekkasjetilfellet være lavere sammenlignet med bakgrunnslekkasje.



Figur 6: Lekkasjeforløpet er avhengig av tre faktorer og lekkasjetype. X-akse: Tid, Y-akse: Volumstrøm (Farley & Trow, 2003, s.74)

Lekkasjeomfanget kan dekomponere i tre punkter:

A	Hvor lang tid tok det før lekkasjen ble oppdaget?
B	Hvor lang tid tok det å kartlegge lekkasjen?
C	Hvor lang tid tok det å reparere/isolere skaden?
= Totale responstid	

2.4 Forbruks- og lekkasjeandel

Det totale vannforbruket for et forsyningsområde består hovedsakelig av faktisk forbruk (nytteforbruk) hos abonnentene og vannlekkasje i ledningsnett (Trifunovi, 2015, s.22):

$$Q_{total} = Q_{forbruk} + Q_{lekkasje} \quad [16]$$

I et forsøk på å anslå lekkasjetapet foregår beregningene i hovedsak av to metoder (Thornton et al., 2008, s.83):

- 1) Vannbudsjettmetoden (Topp-ned strategi)

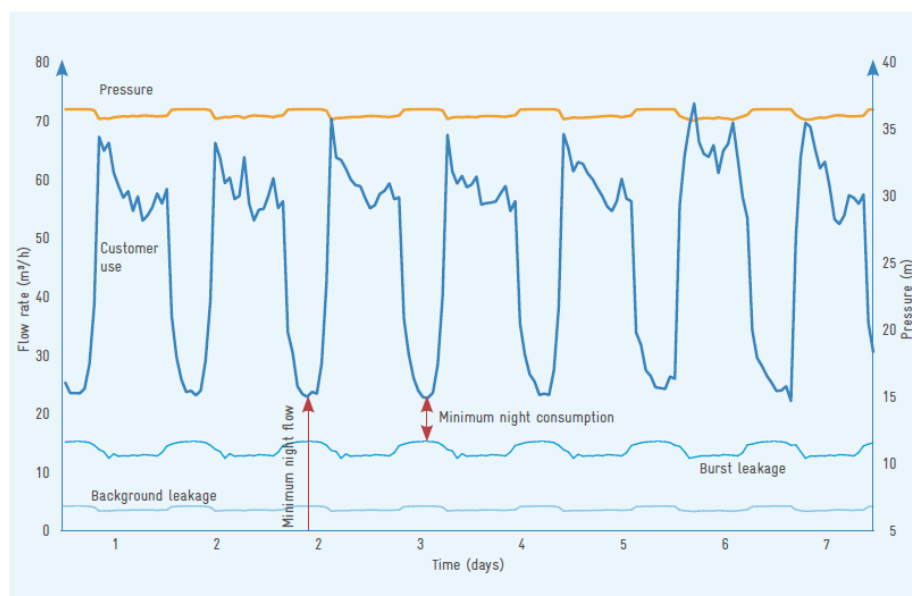
Lekkasje = Distribuert/produisert mengde – forbruk

- 2) MNF metoden (minimum nattforbruk) – Bunn-topp strategi

Lekkasje = (Observert nattforbruk – legalt nattforbruk)

2.4.1 Minste nattforbruk

Minste nattforbruk er vanligvis mellom tidsrommet 01:00 - 04:00. Nattforbruket er mindre påvirket av dagsbruken fra både konsumentene og industrisektoren. Derved kan observert nattforbruk betraktes som lekkasje fratrukket legale nattforbruket. Det legale forbruket består av dobesøk, dusjing og annet vannforbruk i nattestid. Desto korrekte vannmålinger i sonen er, desto bedre lekkasjeestimat. På denne måten dannes et bilde av omfanget rundt bakgrunnslekkasje som funksjon av trykk. Datasettet for minste nattforbruk vil variere gjennom året, slik at det vil være hensiktsmessig å analysere for å lengre perioder. MNF- og vannbudsjettmetoden bør brukes sammen for å utnytte hverandres styrker (Asplan Viak, 2018; Thornton et al., 2008).



Figur 7: Illustrasjon på som viser sammenheng mellom varierende dagsforbruk, minste nattforbruk, lekkasje og trykk (Ziegler, 2011)

Dersom det ikke er tilstrekkelig data om legalt nattforbruk kan man anvende en praktisk metode med forutsetning om at sonen har en normal døgnvariasjonskurve¹.

¹ Mailuteksling med Knut Bygholm Bjelke (VAV)

- Antar ingen lekkasje i sonen:

$$\text{Minsteforbruk} = 25 \% \text{ av gjennomsnittsforkbruket hos abonnentene}$$

- Antatt lekkasje i sonen:

$$\text{Ønsket min.} =$$

$$\left(\text{gj. snittforbruk} - \frac{(\text{Observert min. forbruk} - \text{gj. snitt forbruk} \times 0.25)}{0.75} \right) \times 0.25$$

$$\text{Antatt lekkasje} = \text{Observert minsteforbruk} - \text{ønsket nattforbruk}$$

2.4.2 Nøkkeltall

ILI (infrastruktur leakage index) er et dimensjonsløs nøkkeltall som forklarer sammenhengen mellom nåværende årlig virkelig vanntap (CARL) og unngåelig årlig tap (UARL). ILI gir indikasjon på hvordan virkelig vanntapsmengde er i forhold til gjennomsnittstrykket i sonen. Indeksen forklarer ikke om trykket er optimalt i sonen. I lekkasjereduksjonen er målsettingen å minimere ILI-indeksen. (Farley & Trow, 2003, s.45):

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad [17]$$

Gitt linear lekkasje-trykk kan UARL uttrykke som (Lambert & Thornton, 2005):

$$UARL \left[\frac{\text{liter}}{\text{dag}} \right] = (18 * L_m + 0,8 * N_c + 25 * L_p) * P \quad [18]$$

$$UARL \left[\frac{\text{m}^3}{\text{år}} \right] = (6,7 * L_m + 0,256 * N_c + 9,13 * L_p) * P \quad [19]$$

Hvor:

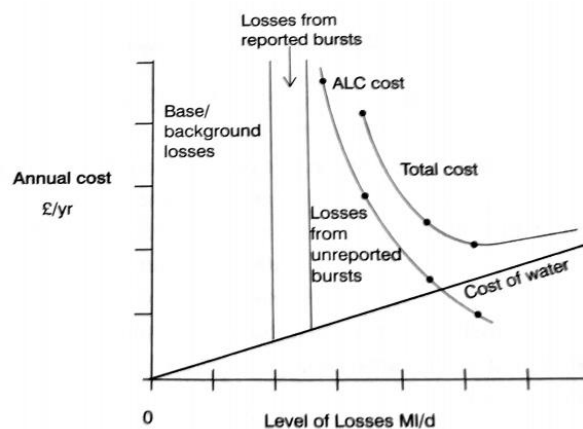
L_m Total lengde på distribusjonsnett [km]

N_c Antall påkobling/anboring med stikkledning [n]

L_p Total lengde på hovedledning til private vannmålere [km]

2.4.3 Lekkasjeøkonomi

Det kommer til et tidspunkt der kostnadene knyttet til lekkasjesøk og vedlikehold ikke gir økonomisk vinning. Besparelspotensialet i lekkasje er marginal slik at det ikke veier opp for nytten. Dette krysningpunktet kalles for økonomisk lekkasjenivå (Farley & Trow, 2003, s.54). Forskjellen på hva som er kort- og langsiktig økonomisk lekkasjenivå er avhengig av lekkasjeomfanget, kostnadene knyttet til vedlikehold, fremtidig investering og vannproduksjon. Lekkasjenivå er gjerne oppgitt i lekkasjevolum per offentlig ledning [m³/km], lekkasjevolum per person [m³/pers] på årlig basis.



Figur 8: Forhold mellom kostnader knyttet til lekkasjesøk/reparasjon med lekkasjemengde (Farley & Trow, 2003, s.56)

2.5 Sammenheng mellom lekkasje og trykk

2.5.1 Konvensjonell tilnærming med Torricellis lov

Med forutsetning om atmosfærisk trykk på utsiden av en vannledning, vil vannføring gjennom en konstant tverrsnittsareal fungere som en «jet-stråle». Utstrømningshastigheten kan uttrykkes som:

$$v = C_d \sqrt{2gP} \quad [20]$$

Lekkasjemengden kan uttrykkes med Torricellis lov og volumstrømlikningen. Dette er en teoretisk tilnærming (Trifunovi, 2015 s.101):

$$Q = C_d A \sqrt{2gP} = C_d A (2gP)^{N1=0.5} \quad [21]$$

Hvor:

Q	Lekkasjemengde[m ³ /s]
v	Vannhastighet[m/s]
g	Tyngdens akselerasjon, gitt 9.81 [m/s ²]
A	Tverrsnittsareal på åpning[m ²]
P	Statisk trykk[mVS]
C _d	Vannføringskoeffisient (<1). Dimensjonsløs
N1	Lekkasjeeksponent. Dimensjonsløs

2.5.2 Modifisert tolkning av lekkasjeeksponent (N1)

Det antatte lekkasjeeksponenten på 0,5 i Torricellis har vist seg å ikke være konstant. Figur 9 viser N1-verdi varier med et spenn 0,52-2,95 etter 150 tester i respektive land. Med andre ord er lekkasjeraten antagelig mer sensitiv ovenfor trykk enn først antatt. (Van Zyl & Clayton, 2007; van Zyl, 2014) legger vekt på at rørmaterialets egenskaper har størst forklaringskraft på lekkasjekoeffisienten (heretter N1). Faktorene som vannforbruk/etterspørsel, jord- og lekkasjehydraulikk vil påvirke i ulike grad.

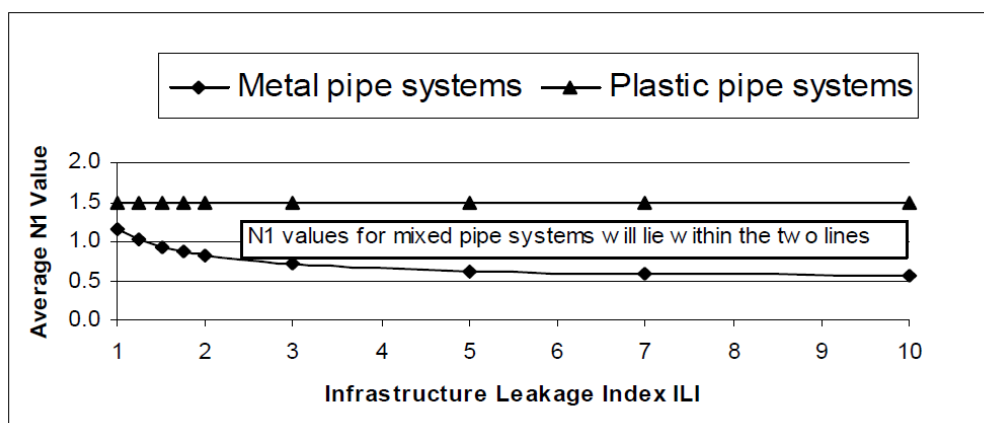
Country	Number of Zones Tested	Range of N1 Exponents	Average N1 Exponents
United Kingdom (1970s)	17	0.70–1.68	1.13
Japan (1979)	20	0.63–2.12	1.15
Brazil (1998)	13	0.52–2.79	1.15
United Kingdom (2003)	75	0.36–2.95	1.01
Cyprus (2005)	15	0.64–2.83	1.47
Brazil (2006)	17	0.73–2.42	1.40
Totals	157	0.36–2.95	1.14

Figur 9: Observert N1-verdier på felt- og laboratoriumsarbeid (Thornton et al., 2008, s.142)

2.5.3 Effekten av materialegenskap og lekkasjeeksponent (N1)

Lekkasjeforekomster i rigide og faste vannledninger (betong- og metallegenskaper) har N1-verdi tilnærmet 0,5 da størrelsen på lekkasjeåpning er konstant. N1-verdi over 1,5 kan gi en indikasjon på komplisert lekkasjehull. Dette skyldes i stor grad av at rørmaterialet er mer sensitiv for trykkendring, eksempelvis vannledninger med elastiske egenskaper. Variasjon i trykk og rørmaterialet vil påvirke lekkasjeåpningen i to dimensjoner: lengde- og radialretning. Det betyr at lekkasjevolumet ikke er utelukket avhengig av trykk og bør ses i sammenheng med effekten av $C_d \times A$. Kontraksjonskoeffisienten har en tendens til å øke med Reynoldstall. Vannets viskositet, densitet og hastighet bidrar til å bestemme strømmingens karakter (Lambert, 2001).

På nåværende tidspunkt er det sjeldent man finner rendyrket homogent ledningsnett. Figur 10 viser sammenhengen mellom N1-verdi og ILI.



Figur 10: Sammenheng mellom N1-verdier og infrastruktur lekkasjeindeks gitt ledningsmateriale (Lambert, 2001)

Bakgrunnslekkasje har tilnærmet N_1 -verdi = 1,5 uavhengig av rørmateriale. Ved mangel på informasjon, er det rimelig å anta lineær sammenheng mellom trykk og lekkasje som tilsvarende $N_1 = 1,0$ (Lambert, 2001; Thornton, 2003). En annen måte å estimere N_1 er å analysere nattstrømningsdata i sammenheng med trykk og observere lekkasjenivået. Alternativt vil gjennomsnittsverdi på $N_1 = 1,15$ betraktes som godt estimat (Farley & Trow, 2003 s. 154; Lambert, 2001).

Potensloven blir introdusert som en forenkling av Torricellis likning [21]. $C_d \times A \sqrt{2g}$ er komprimert i konstanten, k . Likningen er empirisk utredet og er en praktisk tilnærming for lekkasjeberegning. Potensloven er anbefalt av IWA, og er «best practice» da likningen rent fysisk beskriver trykk-lekkasjeforholdet godt (Lambert, 2001; Thornton, 2003):

$$Q \cong kP^{N_1} \quad [22]$$

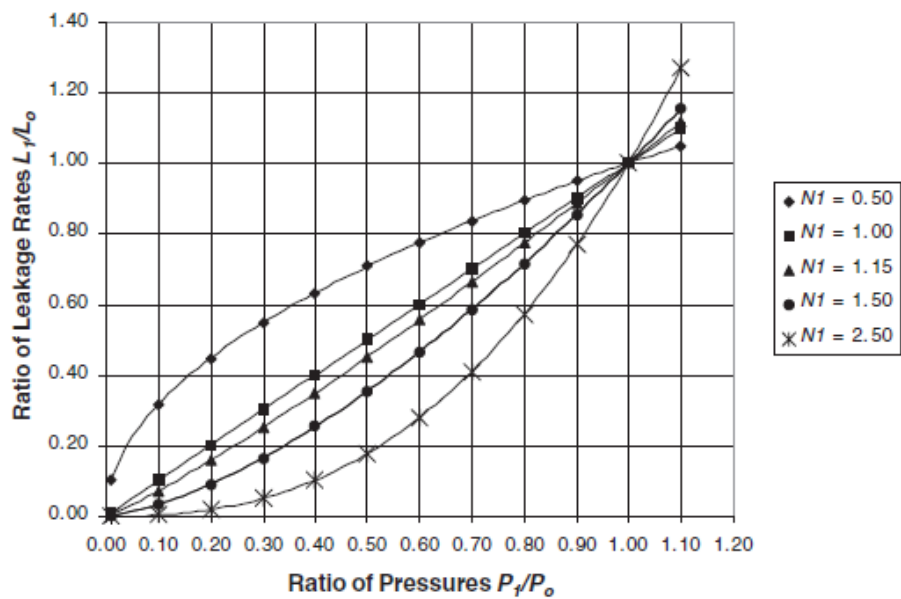
og

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_1} \quad [23]$$

Hvor:

Q_0	Lekkasjevolum før trykkendring[m ³ /s]
Q_1	Lekkasjevolum etter trykkendring
P_0	Initiell tryk[mVS]
P_1	Justert trykk[mVS]
k	Lekkasjekonstant. Dimensjonsløs.

Figur 11 illustrerer hvordan lekkasjenivået er i forhold til reduksjon/økning i trykk gitt bestemt



Figur 11: Generell forhold mellom trykk- lekkasje ved bestemte $N1$ -verdier (Farley & Trow, 2003)

2.5.4 FAVAD-konsept

(May, 1994) introduserte FAVAD-konseptet (Fixed and variable area discharges concept) for å belyse hvorfor $N1$ varierer fra trykk, rørmateriale og type lekkasje. Lekkasje hull skal ikke lenger betraktes som rigid åpning da det potensielt vil utvide grunnet trykkøkning, rørmateriale og dets tilstand. En modifisert Torricellis lov [21] gir likningen:

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + m h^{1.5}) \quad [24]$$

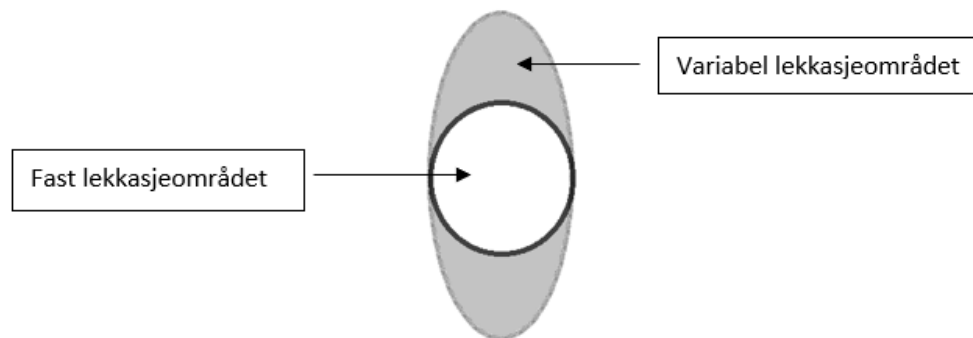
Hvor:

A_0 Lekkasjeåpning ved null trykk i rør[m²]

h Trykk[mVS]

m Helning til trykk-området

I senere tid har eksperimentelle studier konkludert med at lekkasjekonstanten er lineært trykk- og materialavhengig (Cassa et al., 2010; Ferrante et al., 2013; Van Zyl & Clayton, 2007). Dette forsterker FAVAD-konseptet da det gir en realistisk tilnærming til lekkasjeomfanget sammenliknet med likningene [21] og [22].



Figur 12: Sammenheng mellom fast- og variabel lekkasjeområdet ved FAVAD-konsept

2.6 Trykkforvaltning

I mange år har dimensjonering av distribueringsnettverk og trykksoner tatt høyde for å levere tilstrekkelig med vann til forbrukerne, næringslivet og ekstraordinære situasjoner som brann. For å dekke dette vannbehovet ble det etablert høy servicevennlig trykk. Det var ikke før sent i 1990 at kunnskapen om trykk-lekkasjeforholdet ble implementert i drift og planlegging av distribusjonssystemer (Thornton et al., 2008). Dette har preget måten man designer ledningsnett med fokus på forsvarlig trykkforvaltning gjennom optimaliserte trykksonegrenser (eksterne regulering) og trykk i sonene (interne regulering).

Det vil være forsyningsområder som ikke vil ha nytte av trykkregulering. Enten er vannbesparelsen ikke betydelig og/eller at den tekniske løsningen ikke tilfredsstillende ønsket vannbehov. Det er ulike faktorer som påvirker effekten av trykkforvaltning og hvilke styringsregime som egner seg best i dagens og fremtidig situasjon. En kostnads-nytte-analyse kan bidra til å forsterke beslutningsgrunnlaget og oppveie om trykkforvaltning er nødvendig. Problemstillingene kan være:

- Økt forbruk som følge av urbanisering
- Mindre forbruk som følge av desentralisering
- Tilgang til vannforsyning
- Lav/høy lekkasjeandel

- Ledningsnettets tilstand og leveår
- Økonomiske/kompetanse begrensninger

Det er viktig at optimaliserte trykkforvaltning skal foregå innen gitte rammebetingelser i form av funksjonell og juridiske krav. TEK17 er byggeteknisk forskrift med veiledning for tekniske krav (Direktoratet for byggkvalitet, 2017):

1. Krav til vanntrykk:

På internasjonalt nivå er et driftstrykk på 2-6 bar normalt i en sone. I Norge er det mer vanlig med 2-8 bar grunnet store høydeforskjeller. I henhold til TEK17, er det et krav på minstetrykk på 2,5 bar på den offentlige vannledningen for et tettbebygde område. Videre anbefales det 3 bar for leilighetspregede områder.(Ødegaard et al., 2014, s.264).

Det skal monteres reduksjonsventil dersom vanntrykket overskrider 6 bar inn til abonnenten, jmfør TEK17 §15-5(2)-2 ledd.

2. Krav til slokkevannskapitet:

Slokkevannskapiteten skal være minst 20 l/s i småhusbebyggelse og 50 l/s i annen bebyggelse, jmfør TEK17 § 11-17 (2) – 2 ledd. Varigheten på brannslukning er avhengig av brannens størrelsesorden, spredningsfare og behov for etterslokking. Som regel varer et brann 2-6 timer og skal være mulig å tappe med minstetrykk på 1 bar for den dimensjonerte brannvannkapasiteten (Ødegaard et al., 2014, s.158). Hensikten med minstetrykket er å forhindre forurensning av vannet og redusert forsyningskapasitet ved luftinnsuging. Det er undertrykk i vannledningen som forårsaker problemet.

For kritiske områder vil det være en fordel med trykkforsterkningspumper dersom trykknivået ikke er akseptabelt. Det er en diskusjon om det er abonnenten eller kommunen som har ansvaret for anskaffelse av slik materiell. Trykknedsenking kan også gi konsekvenser for sprinkelanlegg. Mangel på trykk i nettet, spesielt i nattestid, fører til at anlegget ikke utløses (Ellefsen, 2016).

Trykkforvaltningen foregår ved å styre distribuert trykk i et forsyningsområde. Dette er mulig å utføre ved å bestemme styringsregler for pumpe, ledninger og trykkreduksjonsventiler i trykksonen. Trykkstøt og kavitasjon kan forekomme ved bruk av ventiler og forårsake store

skader i ledningsnettet. I henhold til teknisk forskrift stilles det krav til løsning for å forhindre potensiell fare.

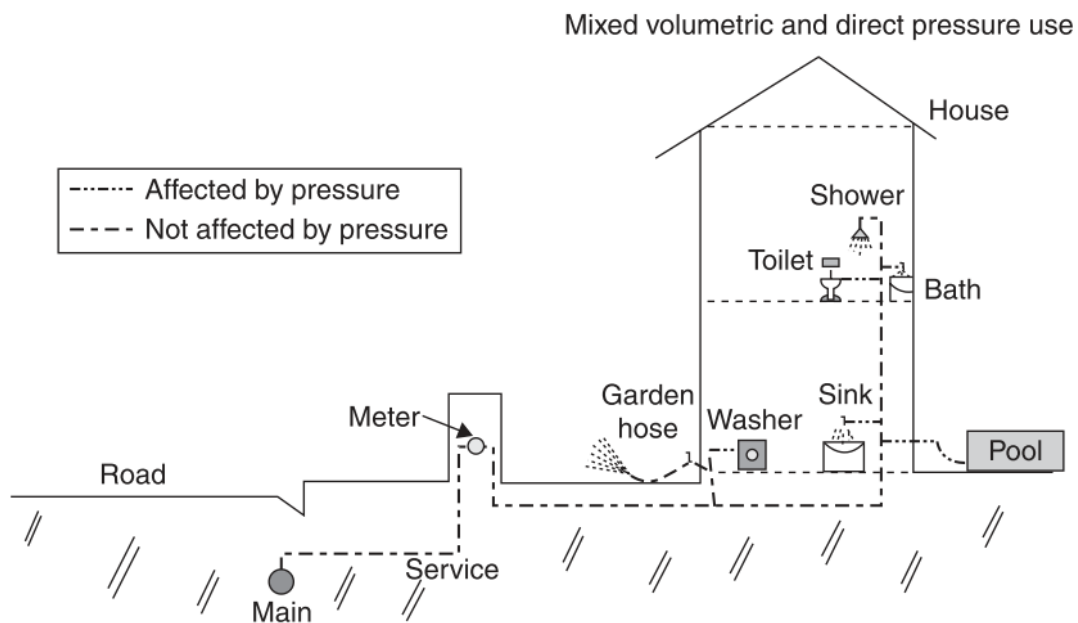
Det vil være behov for kontroll og vedlikehold av styringsanleggene. Det er anbefalt med rutinesjekk minst en gang i året i tillegg til overvåkning av anlegget (Farley & Trow, 2003, s.170).

Redusert trykkbelastning i nettet er en direkte konsekvens av trykkreduksjon, spesielt i nattetid. Fordelene knyttet til trykknedsenking (Flatin, 2009; Lambert & Thornton, 2005):

- Lavere bruddfrekvenser da bruddtilfeller anses å ha en sammenheng med høyt driftstrykk
- Redusert reparasjons- og rehabiliteringskostnader (tilfeller)
- Redusert lekkasjevolum
- Avlaste avløpsledninger og avløpsrenseanlegg ved å redusere fremmedvannandelen
- Økt levetid i ledningsnett
- Lekkasjehull vokser saktere

2.6.1 Påvirkning hos abonnentene

Trykkreduksjon påvirker abonnentene både direkte og indirekte. Husholdningsforbruk eller volumbasertforbruk som do, oppvask- og vaskemaskin er indirekte berørt av tilgjengelig resttrykk hos forbrukeren. Dette forbruket er gjerne dimensjonert som konstant forbruk normal periode. Hagearbeid, dusj, sprinkelanlegg, brann, brudd/lekkasje i ledninger, vannspyling for rengjøring av bil og husets ytre vil være direkte påvirket av fall i trykk.

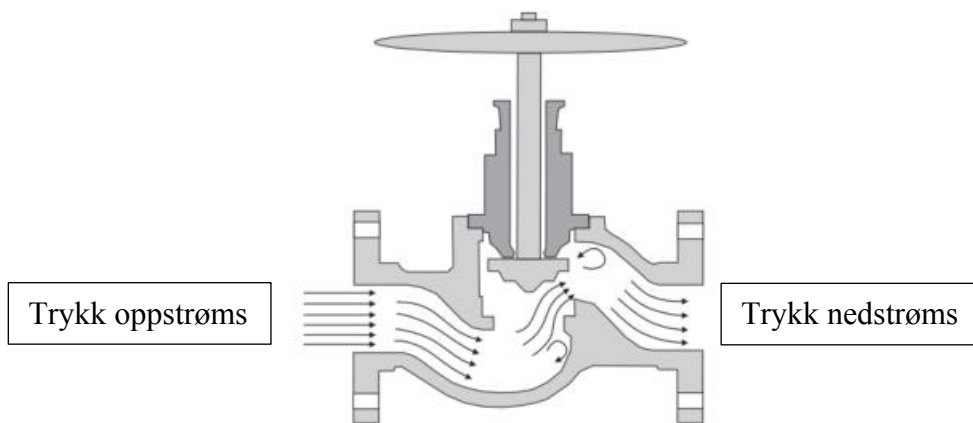


Figur 13: Trykkpåvirkning hos abonnent (Thornton et al., 2008, s.25)

2.7 Egenskaper og valg av trykkreduksjonsventiler (TRV)

Trykkreduksjonsventilen (TRV) primære funksjon er å redusere et varierende høyt vanntrykk oppstrøms til et driftsvennlig trykk nedstrøms ventilen som også blir kalt settetrykk (Ødegaard et al., 2014, s. 244 og 271). I ventilen oppstår det et trykkfall. Trykkfallet er forskjellen mellom oppstrøms og nedstrøms trykk. Hver ventil har ulike karakteristikk og egenskaper knyttet til vannregulering. Valg ventiltyper bør ta stilling til (Farley & Trow, 2003, s.166):

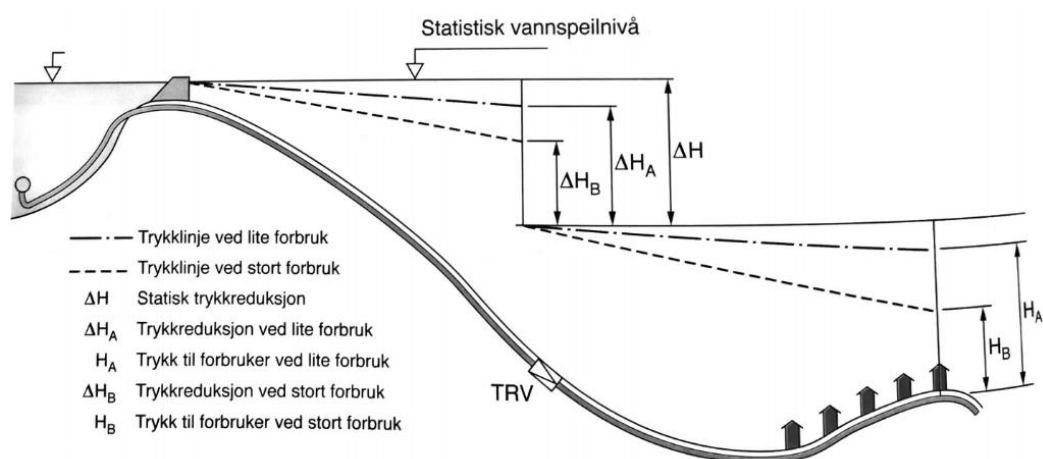
- Relabilitet: Er ventilen troverdig ut ifra tidligere erfaringer?
- Kvalitet: Tilfredsstiller ventilen kravene?
- Egnethet: Passer ventilen i systemet og dets formål?
- Forventet levetid: Når må vi utskifte ventilen og er det økonomisk grunnlag å investere?
- Drifts- og vedlikehold: Hvilke arbeid kreves det å drifte og har vi tilgjengelig arbeidskapasitet?
- Støtte: Mulighet til brukerstøtte hos leverandøren?
- Standardisering: Er ventilen fleksibel og kan spesialtilpasse etter egne driftsønsker?



Figur 14: Prinsippskisse av TRV (Walski et al., 2003, s.40)

2.7.1 Bestemme settetrykk i TRV med kritisk punkt

Det er vanlig at ventilen er innstilt for å opprettholde HGL i sonen. Nedstrøms trykket skal være dimensjonert til å levere minstekravet i perioder med maksimal forbruk i et kritisk punkt i nettet. Kritisk punkt er som regel bestemt av topografien og ligger i utfordrende områder i sonen. Trykket i sonen vil generelt være høyere som er en konsekvens av at ventilen er dimensjonert for det kritiske punktet. Trykklinjen reagerer simultant med endrede forbruk. Ved nattforbruk vil trykklinjen være slakk fra ventilen og bratt ved høy forbruk. Trykklinjen vil ikke overstige den forhåndsinnstilte innstillingen i PRV for maks leveringstrykk.



Figur 15: Sammenheng mellom trykklinje og forbruk ved bruk av TRV (Ødegaard et al., 2014, s.244)

Gjennom de siste 15 årene har et utviklet avanserte variasjoner av trykkreduksjonsventiler drevet av en eller kombinasjoner av mekanisk, hydraulisk og/eller elektronisk komponent. Trykkreduksjonsventilene deles opp i tre hovedgrupper som beskriver dens styringsregime: konvensjonell-, tids- og mengdestyrt.

2.7.2 Konvensjonell TRV

Ventilinnstilling i konvensjonell TRV settes til å holde konstant trykk nedstrøms uavhengig av varierende trykk og vannføring på oppstrøms siden. Settetrykket i ventilen skal ta høyde for å levere tilstrekkelig trykk for kritisk punkt ved maksforbruk. Settpunktet er som regel noe høyere for å ta hensyn til tap i nettet. Siden ventilen er dimensjonert etter maksforbruket, vil ventilen levere høyt trykk på nattetid. Dette belaster ledningsnettet og gir høy lekkasjevannføring som burde være foruten. Til gjengjeld er ventilen driftssikker og leverer stabil trykk. Et forsyningsområdet med lavt forbruk, energitap i ledningen og sesongvariasjoner, vil ha størst nytte av ventilen (Foundation, 2007; Thornton et al., 2008, s.311).

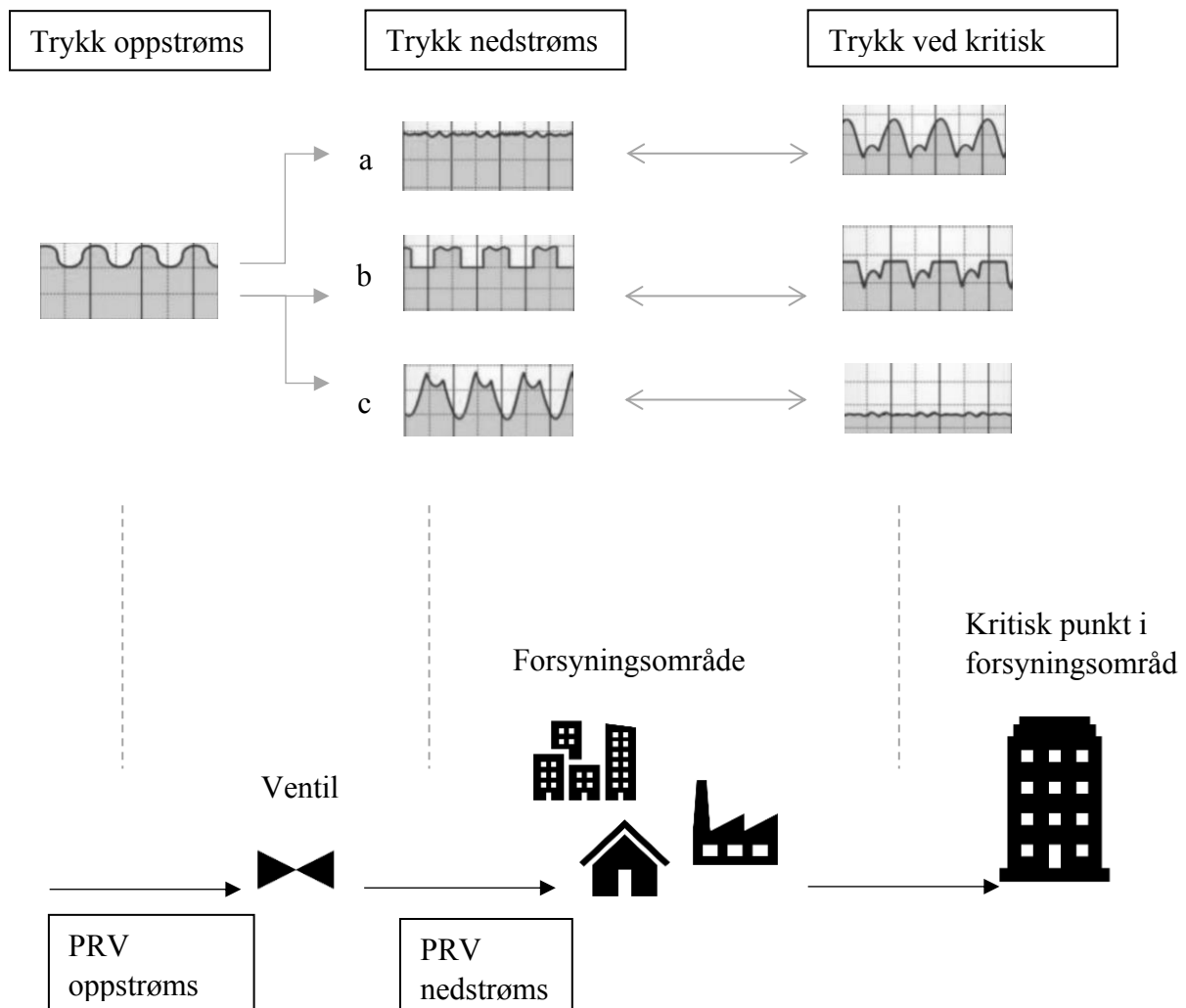
2.7.3 Tidsstyrt TRV

Tidsstyrt PRV har settpunkt som varierer med tiden. Ventilen er som regel innstilt til å senke nedstrøms trykk på nattetid da vannforbruket er på det laveste. På dagen blir ventilen innstilt med en annen settpunkt. Ventilen er den billigste løsningen innen avansert trykkstyring men krever noe vedlikeholds- og driftsarbeid (Foundation, 2007). Tidsstyring egner seg best for områder med stabilt forbruksmønster med lite sesongs- og dagsvariasjon. Store variasjoner i forbruk gjør at det er utfordrende å bestemme optimale styringsregler for ventilen. Nettet har en tendens til å være sårbar ved branntilfeller gjør at en må forsikre minste leveringstrykk som tilfredsstillende brannvann tapp. Besparelspotensialet i vannforbruket bør derfor vekte lønnsomheten mot driftssikkerheten og beredskapsrutine. Når sikring av vannleveranse og krav til driftssikkerhet er høyest prioritert, bør tidsstyring vurderes sammen med andre løsninger for å komplementere hverandre (Thornton et al., 2008, s.585).

2.7.4 Mengdestyrt TRV

En mengdestyrt TRV er selvregulerende etter etterspurt forbruk på nedstrøms siden. Ved lav forbruk vil trykket i systemet synke og ventilen vil kompensere ved å øke trykket i sonen og vice versa. Det er pilotsystemet som regulerer ventilåpningen innenfor forhåndsinnstilte restriksjoner av min- og maksverdier for leveringstrykket. Falltaptet i ventilen skal kompensere for falltaptet i kritisk punkt. På denne måten sørger ventilen for å at falltaptet i kritisk punkt holder tilnærmet konstant i motsetning til konvensjonell TRV. På denne måten vil nettet oppnå høyere vannbesparelse, spesielt i perioder med lavt forbruk.

Det har blitt oppdaget mindre bruddforekomster i ledningsnettets ved bruk av ventilen. Det skyldes av at nettet ikke blir utsatt for betydelig overskuddstrykk man ellers hadde fått ved konvensjonell TRV. Forutsigbarheten og fleksibiliteten med mengdestyrte TRV gjør at den er robust for områder med varierende forbruksmønstre da systemet responderer umiddelbart ved branntilfeller (Farley & Trow, 2003, s.171; Foundation, 2007; Thornton et al., 2008, s.585).



Figur 16: Ventil i et forsyningsområde med kritisk punkt. Inspirert illustrasjon fra (McKenzie & Wegelin, 2009). A) Konvensjonell B) Tidsstyring c) Mengdestyrt.

2.8 Erfaringer fra internasjonale studier om trykkstyring

2.8.1 Forbruksstyrte- vs. Trykkstyrte modeller

I forbruksstyrte modeller (DDA) er forbruket konstant i nodene og er ikke trykkavhengig. Slike modeller antar at tilgjengelig trykk og påkrevd trykk i nodene er lik til enhver tid. Ved høy forbruk, f.eks. brann, vil systemet fortsatt kunne levere den etterspurte vannmengden til tross for at trykket i noden er negativt. Dette er en svakhet siden forbruk også er trykkdrevet på samme måte som lekkasje. Denne tilnærmingen fungerer dersom systemet ikke opplever mangelfull trykk. Trykkdrevet modeller (PDA) tar høyde for forbruk-trykk forholdet og gir realistiske resultater sammenlignet med DDA (Suribabu, 2015; Tanyimboh & Templeman, 2010).

2.8.2 Avansert modellering ved bruk av optimaliseringsalgoritmer

Allerede i 1990-tallet forsøkte forskerne å anvende algoritmer for å oppnå konstant trykk i nodene uavhengig av høyden de befinner seg. For å minimere overskuddstrykk i samtlige noder ble kontrollventiler, spesielt mengdestyrte ventiler, tatt i bruk som regulerer vannstrømningen etter trykk i nodene. Innstillingene til kontrollventilene ble beregnet av lineær og ikke-lineær programmering. Ved å simulere modellen etter lav, gjennomsnittlig og høyt forbrukskurve, var reduksjonspotensialet i lekkasje høyere for økende forbruk. For nettverk med færre noder var potentialet tydelige (Germanopoulos & Jowitt, 1989). Det ble observert reduksjon i lekkasjenivå på 19,2 % (Sterling & Bargiela, 1984).

Avanserte modellering bygger på de grunnleggende premissene men har større fokus på å optimalisere lokasjon for ventilene i sonen. NSGA-II er den mest populære algoritmen innen multiobjective genetic algorithms (GA). Algoritmene opererer ved å optimalisere to objektsfunksjoner: (1) Minimere antall PRV med gitt settetrykk innenfor maks- og minstetrykket (2) minimere totale lekkasjemengden.

Framgangsmåten egner seg godt for store og komplekse forsyningsområder. Det har blitt observert 20-25 % lekkasjereduksjon sammenlignet med opprinnelig situasjon i nettet (Araujo et al., 2006; Gupta et al., 2020; Roshani & Fillion, 2014; Saldarriaga & Salcedo, 2015).

Det har gjort studie som viser at det er lite forskjell i lekkasjereduksjon mellom mengderegulerte TRV og tidsstyrte TRV. Mengderegulerte ventiler er likevel robust over store variasjoner i forbruk da den ikke krever avansert programmering. Reduksjonspotensialet ligger på 20 % sammenlignet med tidligere lekkasjenivå (AbdelMeguid & Ulanicki, 2010)

3. Metode

Metodekapittelet er tredelt. Del 1 vil redegjøre kort vurdering av datakvaliteten. Del 2 dreier seg om å bestemme trykk-lekkasje forholdet for å kunne trykkstyre ventilen. Det vil bli presentert hvilke antakelser som er blitt gjort for å kalibrere og klargjøre modellen. Del 3 vil nevne metode for lekkasjeberegning og valg av kritisk punkt i sonen. Det vil bli forklart trinnvis framgangsmåte for styringsregler i ventilen. Funksjonstest av valgte ventilinnstillinger blir siste del i metoden. Hensikten med funksjonstesten vil være å avdekke sårbarheten i sonen ved brann og stengte elementer.



Figur 17: Overordnet strategi for casegjennomføring

Casebeskrivelse

Oslo vann- og avløpsetaten har det overordnede ansvaret og visjon å gi rent vann til både mennesker og natur i kommunen. Etaten er derfor delt opp seksjoner som arbeider innenfor egne satsningsområder. Seksjon vanndistribusjon (VDI) har to hovedmål (Oslo VAV, 2015a):

- i) Distribuering av drikkevann skal være på en sikker og robust måte.
- ii) Det totale vannforbruket i form av nytteforbruk og lekkasje skal ikke overskride 2014-nivået som tilsvarer 100 millioner m³.

I dag er lekkasjenivået omtrentlig 35 % på både privat og offentlig ledningsnett. Diverse vanntap på 2,3 % gjør at det samlede tapsberegningen ligger i underkant av 38 % av vannregnskapet (Oslo VAV, 2015a). I 2013 oppnådde ikke kommunens målsetting å redusere lekkasjenivået til 28 %. I den reviderte handlingsplanen ønsker VAV å redusere lekkasjenivået til 20 % innen 2030.

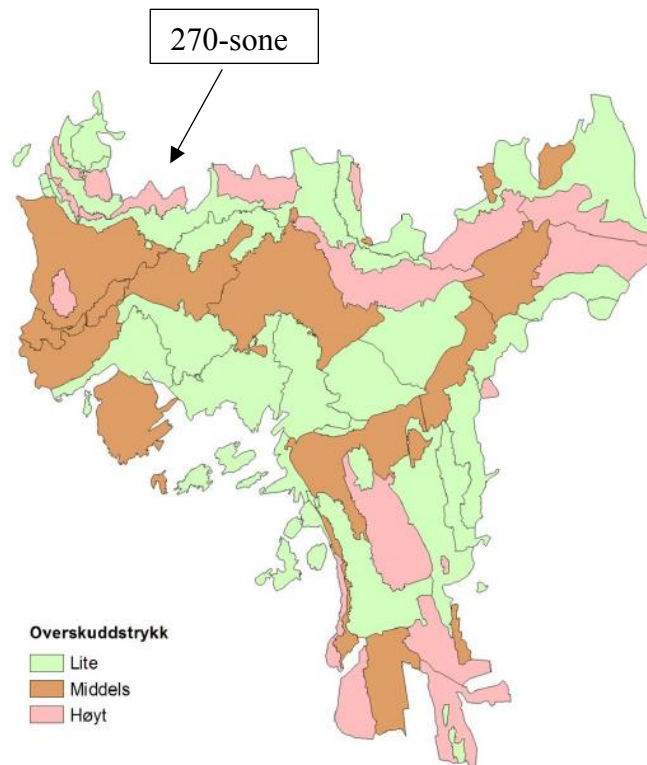
Oslo er delt opp i forskjellige trykksoner som på en hensiktsmessig måte skal sikre vannleveranse til utfordrende områder. VAV er opptatt av å levere servicevennlig og robust driftstrykk på 2-5- 4,0 bar men er pliktig til å levere minstetrykk på 2 bar i hovedledningene.

Ledningsnettets i Oslo er preget av aldrende grått støpejernrør fra 1930-tallet, hvorav duktilt støpejern senere ble introdusert i 1960-tallet. Det er en utfordring å lokalisere små tærehull i ledningen da de ikke blir fanget opp av lydapparatet. Tærehull har en tendens til å klynge sammen og forårsaker lekkasje i distribusjonsnettets (Oslo VAV, 2015b).

I løpet av de to siste årene har antall lekkasjeforekomster hatt en nedtagende utvikling som det fremstår i Oslo VAVs hovedplan. I tråd med hovedmålene, ønsker kommunen å intensivere bruken av trykkreduksjonsmetoder og vurderer fortløpende alternative løsninger.

(Bosnjakovic, 2018) observerte flere soner med overskuddstrykk og pekte ut trykkreduksjon som alternativt tiltak. Det er særlig fire metoder som blir nevnt:

Ekstern styring	<ul style="list-style-type: none"> • Optimalisering av trykksonegrenser. Vurdere sonegrensene og foreta tiltak i form av tekniske installasjoner
Intern styring	<ul style="list-style-type: none"> • Permanent styring • Trykkstyring • Nattnedsenking (etter tid) • Dynamisk styring (etter forbruk)



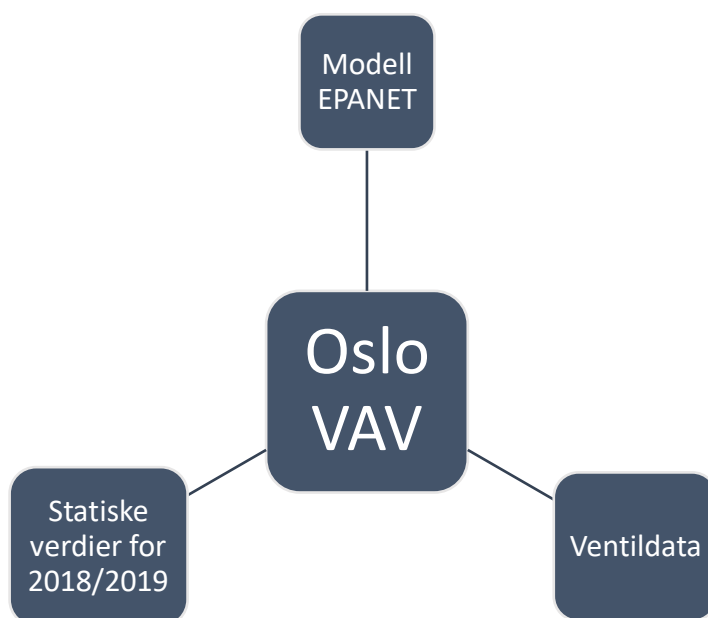
Figur 18: Overskuddstrykk i Oslo-regionen. (Bosnjakovic, 2018)

I dag har 270-sonen tosidig vannforsyning; en pumpestasjon like ved VP10 og en konvensjonell trykkreduksjonsventil i RK55. Ventilen sørger for 90 mVS nedstrøms trykk og står for den primære vannleveransen. VP10 (heretter navnet på pumpestasjonen/reservoar) er turtallregulert til å levere 4 bar til sonen. V10 fungerer i praktisk som back-up. Det er et ønske fra Oslo VAV å ta i bruk pumpestasjonen når det trengs og grunnet driftsmessige årsaker. For å forenkle caset har pumpen blitt erstattet med et reservoar. Dette vil bli forklart i metoden.

Oslo VAV har testet en dynamisk mengderegulert TRV av typen Bermad 7PM (se vedlegg:

Ventilbeskrivelse Bermad 7PM). Fra testlaben er ventilkarakteristikken, forholdet mellom oppstrøms og nedstrøms ventilen, blitt observert å være lineær (Mandusic & Amundstad, 2020). Kommunen ønsker å teste ventilen ute i feltet for å innhente erfaring og observere reduksjonspotensialet i trykk/lekkasje. Kommunen ser på muligheten om skalering i flere trykksoner dersom testresultatene er tilfredsstillende. I dette caset skal Bermad 7PM (heretter Bermad) erstatte opprinnelige trykkreduksjonsventilen i sone-270.

Dette caset har ikke tatt stilling til sprinkelanlegg og sett bort ifra effekten det vil ha for trykkstyring. Det som er mest relevant er hvordan trykksstyring påvirker vannforbruket hos sluttbrukerne, brannvannuttapp og lekkasjenivået.

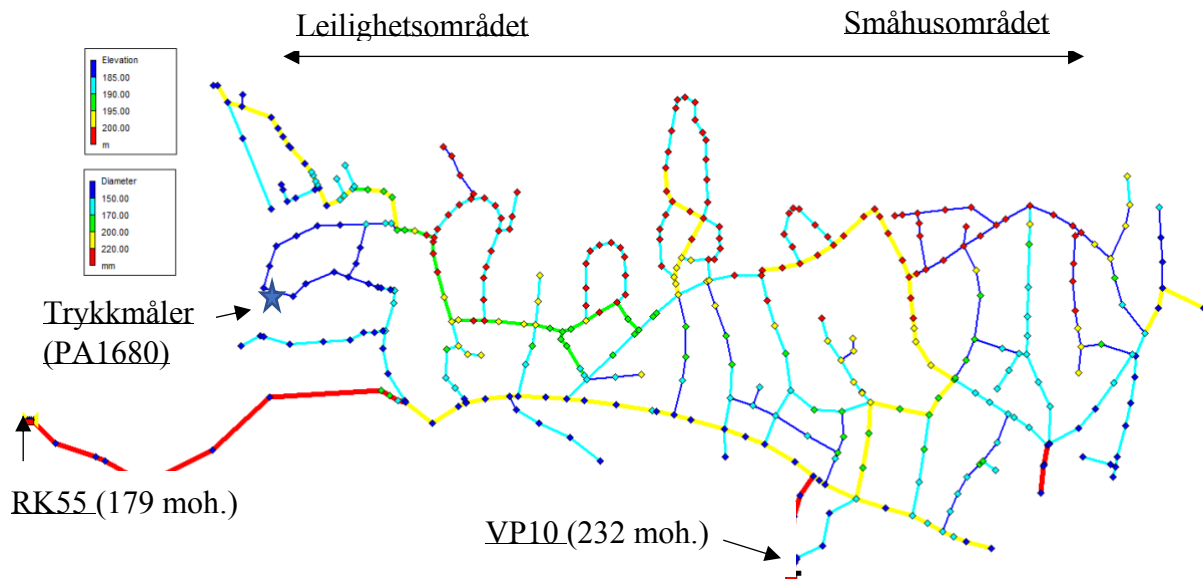


Figur 19: Oversikt over inndata til modellen

Datasamlingen eies av Oslo VAV og har stått for all registreringen av både kvalitativ og kvantitet data. Den opprinnelige modellen for trykksonen ligger i modelleringsverktøyet Mike Urban. For å unngå problematikken rundt opphavsretten og bruk av lisensen, har modellen blitt kalibrert og formatert til en INP-fil som EPANET blant annet støtter. Det forutsetter at det ikke har oppstått feil under kalibreringen ved filoverføring til EPANET, men må belage på å gjøre eventuelle endringer hvis det skulle opp feil/mangel. Videreanalyse av trykksonen vil foregå off-line da EPANET simulerer hydrauliske modeller ved å regne på

historiske data. EPANET er et offentlig modelleringsverktøy innen vanddistribusjon og er utviklet av EPA.

Excel-ark over forbruksdata og trykkmålinger for sonen viser statiske verdier for år 2018 og 2019 blir brukt som inndata i modellen. Datasettet er hentet fra SCADA-systemet til VAV.



Figur 20: 270-sonen som viser høydeforskjell og rørdiameter

Oversikt over objektene i modellen:

- Reservoar/tank:

2 stykker. Disse er plassert ved RK55 og VP10 som skal gi HGL lik 270.

$$\text{RK 55: } 179 \text{ m} + \frac{P}{\rho g} = 179 \text{ m} + 9 \text{ bar} \frac{100\,000 \text{ Pa}}{(9.81 \cdot 1000)} \sim 270$$

$$\text{VP10: } 159 \text{ m} + \frac{P}{\rho g} = 159 \text{ m} + 10.7 \text{ bar} \frac{100\,000 \text{ Pa}}{(9.81 \cdot 1000)} \sim 270$$

Trykk oppstrøms pumpestasjonen ligger rundt 6,0-7,3 bar. Da pumpestasjonen ligger 159 moh., er en løftehøyde på rundt 3,5-4,0 bar nødvendig.

- Pumpe:

2 stykker. Kun en av de skal pumpe. Se vedlegg: Pumpekarakterstikk for VP10.

- Noder/knutepunkt:

404 noder. 275 av nodene har både forbruk og lekkasje som inndata. 88 av nodene har kun lekkasje. Resten er hjelpenoder.

- Ventil:

2 stykker. Den ene ventilen er stengt slik at kun en er i funksjon.

- Forbruksmønster:

3 mønstre. 2 av disse er forbundet med lekkasjenodene som gjelder for hele døgnet og tidsperioden 07-10. Siste forbruksmønster er for forbruksnodene.

- Ledninger:

434 ledninger. Rørdiameter varierer fra 50-300 mm. Koeffisienten for ruhet ligger mellom 0,5-36,3.

Del 1: Vurdering av datakvalitet og strategi

1.1 Forbruksdata og trykkmålingene for 270-sonen

I Excel-arket er det registrert «fryste verdier» i perioden 19.01.2019 - 21.01.2019 på 28.02 l/s på forbruket. Dette er et vanlig problem og er et resultat av at PLS-programmet har stoppet. Dette lar seg løse ved å re-starte programmet på nytt eller via SCADA. «Fryste verdier» tilsvarer kun 47 av 8760 målverdier, 0.50 % av totale målserien. Det mangler også perioder data fra trykkmåleren (PA1680) ute i sonen. 27 % og 19 %² av trykkverdiene er av tilfelle «bad» for henholdsvis år 2018 og 2019. Manglende trykkverdier har ikke stor betydning da det observerte trykket holder tilnærmet konstant HGL på 270.

Det har ikke blitt observert bemerkelsesverdige hendelser (for eksempel brudd) utenom nevnte feil og mangler i datasettet. Utenom dette fremstår datasettet som troverdig.

1.2. Modellen for 270-sonen

I modellen er det blitt observert høye ruhetsverdier Dette gjelder spesielt ledninger som består av grått støpejern. Den mulige forklaringen skyldes av vannkvalitet i 2008/2009 og lav

² Det er totalt 8760 måleverdier for trykk. 27 % og 19 % gir tilsvarende 2374 og 1670 «bad»-tilfeller.

vannhastighet i utkanten av nettet. Dette har sørget for at høye ruhetsverdier var vanlig på gamle rør av grått støpejern³.

Lekkasje i modellen er beregnet ut fra vannbalanseberegningen da den laget. Lekkasje har blitt modellert for utvalgte områder i sonen for å simulere den totale lekkasjen. I senere tid har det dukket opp flere leiligheter og andre fasiliteter som det ikke finnes forbruksnode på. Det tyder på at modellen har et oppdateringsbehov.

I modellen var det noen noder som manglet høydeverdier. Dette var ikke kritisk og ble løst ved å velge naturlige verdier som samsvarer med topografien i sonen.

I forkant av videre modellering vil det være nødvendig å oppdatere forbruksmønsteret slik at det samsvarer med dagens situasjon. Samtidig må lekkasjen i sonen modellere som trykkavhengig forbruk. Dette er essensielt for å kunne vurdere virkingen av den dynamiske forbruksstyrte reduksjonsventilen. Vi belyser mer om dette i del 2 av metode-kapittelet.

Del 2: Kalibrering og klargjøring av modell

2.1 Modellverktøy

Modelleringsverktøyet EPANET baserer simuleringene som forbruksdrevet i nettet. EPANET antar at vannstrømmen gjennom nodene er tilfredsstillt/konstant uavhengig av tilgjengelig trykk i noden. Fra teorien er lekkasjemengden avhengig av tilgjengelig trykk i nettet. For at EPANET skal kunne simulere trykkavhengig forbruk er vi nødt av å bruke en funksjon kalt emitter. Emitter benyttes som regel for sprinkelanlegg eller hydranter. I EPANET er emitter plassert i nodene og bruker potensloven [22] i beregning av trykkdrevet forbruk (Rossman, 2000). Summen av lekkasje blir som følger:

$$Q_{total\ lekkasje} = \sum_j Q_j = \sum_j k (H_j^{tilgj.})^{N1} \quad [25]$$

Utnytter likningene **Error! Reference source not found.** [16] og [22] for å uttrykke totale forbruket i systemet som funksjon av tid der p = trykk:

³Mailutveksling med Morten Syrrist (VAV)

$$Q_{total\ forbruk}(t) = Q_{forbruk}(t) + Q_{lekkasje}(p(t)) \quad [26]$$

Falltapet er beregnet med innebygd Darcy-Weisbachs likning i EPANET.

2.2 Konstruksjon av lekkasje-trykk forhold i sonen

Ledningsnettets til 270-sonen er inhomogent men består hovedsakelig av faste materialer som grått- og duktilt støpejern. PE-rør med høy densitet for en resterende andel på 18 % (se vedlegg: Rørsammensetning for sone 270). På bakgrunn av rørsammensetningen, vil det være tilstrekkelig med å velge lekkasjeeksponentene, $N1 = 0,5$ eller $N1 = 1,0$. Siden ledningsnettets i Oslo generelt er gammelt og kvaliteten er ukjent, vil det være lurt å betrakte sonen med lekkasjeeksponent 1,5. Denne lekkasjekonstanten er også et estimat for bakgrunnslekkasje. I dette caset har vi valgt å bruke tre $N1$ -verdier. Følgelig vil det være nødvendig med tre separerte modeller.

2.3 Bestemme lekkasjekonstanten, k

Lekkasjekonstanten, k , kommer fra potensloven [22]. Fra teorien vil lekkasjekonstanten variere for hvert lekkasjetilfelle. I EPANET er det mulig å legge inn separerte lekkasjekonstanter for hver node. I vår case vil det ikke være aktuelt å gjøre dette da det er tidskonsumerende. Dessuten foreligger det ikke tilstrekkelig med data, i hvert fall sikre nok, hvor lekkasje befinner seg i nettet til enhver tid. Dette blir fort for avansert og detaljfokusert slik at modelleringen mister hensikten med oppgaven. På bakgrunn av dette antar vi at én lekkasjekonstant gjelder for hele ledningsnettets. Dette ble utført ved å legge inn en universal emitter-funksjon som forsikrer at lekkasjen er spredt relativt utover nettet. Vi anser dette som en realistisk tilnærming i forhold til den opprinnelige modellen.

2.4 Bestemme lekkasje med modifisert MNF-metoden

Forbruksdata for sonen inneholder både nettoforbruket og lekkasje. For å hente de minste forbruksverdiene ble det i første omgang sortert etter tidspunkt på døgnet. Dette ble utført for å kontrollere om minste forbruksverdiene foregikk på nattestid. Videre blir det laget en

kassediagram av de minste forbruksverdiene for å illustrere variasjon i nattforbruk.

Kassediagrammet bruker median i beregningen slik at ekstremverdier («fryste verdier» faller utenfor. Formålet med denne analysen er å styrke vår utvelgelsesprosess av observert nattforbruk.

MNF-metoden er blitt brukt for å bestemme antatt lekkasje i sonen. Det er gitt forutsetning at natteforbruket består av bakgrunnslekkasje og legalt forbruk. I dette caset er det legale forbruket beregnet ved hjelp av VAVs praktiske metode. Det er knyttet usikkert til metoden da det forutsetter normal døgnvariasjonskurve. For å være på den sikresiden vil det være fornuftig oppjustere observert nattforbruk til nærmeste heltall. Dette gjøres til tross for at vi har brukt medianberegning.

Beregning:

Gjennomsnittsforkbruket i sonen = 22,29 l/s

Registrert minste nattforbruk (median) = 10,4 l/s -> rundes opp til 11,0 l/s

Legalt forbruk = $(22.29 - (11,0 - 22.29 * 0.25) / 0.75) * 0.25 = 3,76$ l/s

Antatt lekkasje = Observert nattforbruk – legalt forbruk = 11 – 3,76 = 7.24 l/s

Kontrollere tallverdi ved beregning av stipulert forbruk (tall hentet fra vedlegg⁴):

Minste nattforbruk = 25 % av stipulert forbruk.

= $0.25 * 416\,424 \text{ m}^3/\text{år} = 3,3$ l/s.

Det legale forbruket bør ligge mellom 3,3-3,76 l/s. Vi velger 3,5 l/s som verdi med observert nattforbruk på 11,0 l/s. Antatt lekkasje i sonen blir 7,5 l/s ved minste nattforbruk.

2.5 Justering av legalt nattforbruk og lekkasje i modellen

Første steg i lekkasjemodellering blir å fjerne konstante lekkasjeandelen fra modellen.

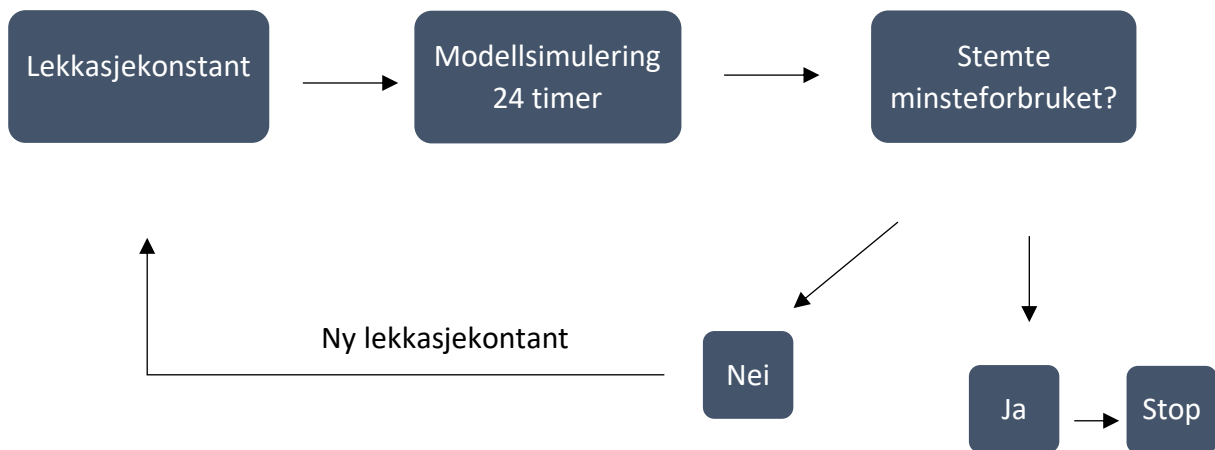
Deretter blir legalt forbruk ved minste nattforbruk justert til 3,5 l/s ved bruk av

⁴ Vedlegg: Stipulert forbruk og anslått lekkasje i 270-sonen

forbruksmultiplikator-funksjonen i EPANET. Andre steg blir å justere lekkasjekonstanten slik at minste nattforbruk blir 11,0 l/s. Da har vi klart å modellere antatt lekkasje på 7,5 l/s som trykkavhengig forbruk ved minste natteforbruk. I vårt tilfelle er dette klokken 04:00.

Justering av lekkasjekonstanter er en iterativt prosess da det involverer testing av mange konstanter til vi får det bestemte nattforbruket (Cobacho et al., 2015). Fra likning [22] kjenner vi totale lekkasjen og gjennomsnittlig trykk i sonen for å beregne første konstanten vi itererer. Siden lekkasjen er antatt å være jevnt fordelt i sonen, må konstanten dividere med antall noder, N (Walski et al., 2003, s.462):

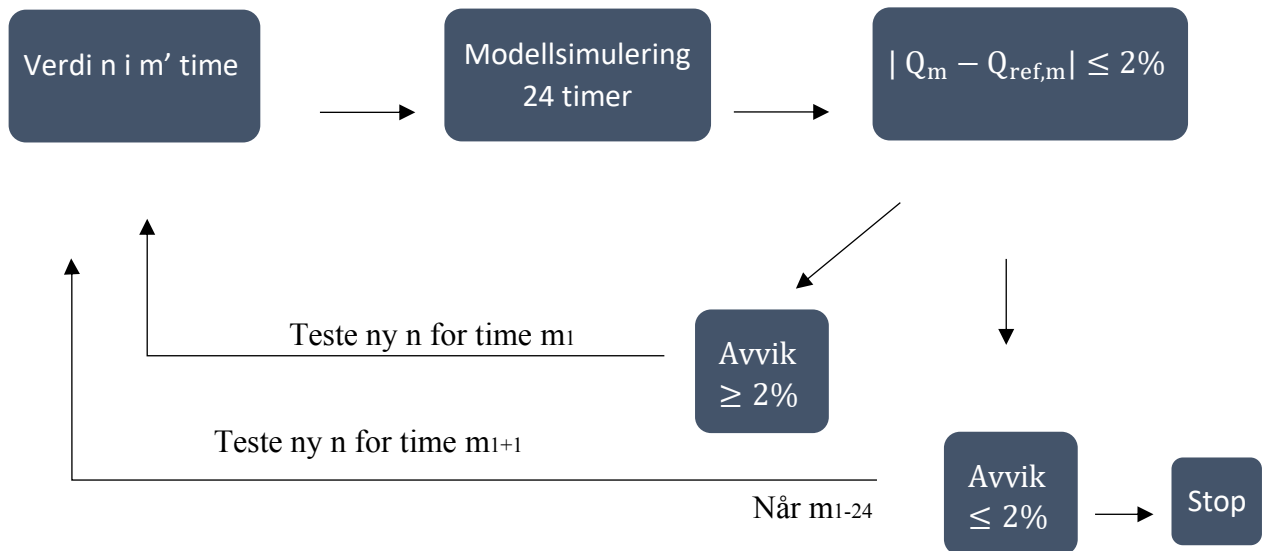
$$K_n = \frac{k}{N} \quad [27]$$



2.6 Justere middeldøgnforbruket i EPANET

I modellen lå det et eksisterende forbruksmønster som er en serie med timefaktor for et døgn. Hver forbruksnode multipliserer med timesfaktoren for å simulere døgnforbruket. Det virkelige forbruket er derfor tidsavhengig. Det er et behov å oppdatere den originalere forbruksmønstret for å samsvare middelforbruket de to siste årene, Q_{ref} . Hensikten er å få modellen virkelighetsnær så mulig. Kalibreringsarbeidet var tidskrevende og hadde ikke minst store rom for feiltasting. Vi tillot en feilmargin på under 2,0 % under kalibreringen for hver time og anser det som tilstrekkelig estimer. Timesfaktorene måtte kalibreres med nøyaktighet på tre desimaler for å holde innenfor feilmarginen. Iterativ prosessen startet for

time $m_1 = 1$ med gitt startverdi for timesfaktor n , og utføres til $m_{24} = 24$ timer. Kalibreringen er blitt separert for tre modeller.



Del 3: Modellsimulering og funksjonstest

3.1 Beregne lekkasjeandel og tilhørende kostnad

I modellen er lekkasje oppgitt i liter per sekund. For hver modell med tilhørende $N1$ -verdier, blir lekkasje generert. Lekkasjeandelen blir deretter beregnet ved bruk av [26] der døgnforbruket er fratrukket nytteforbruket. Lekkasje uttrykt i volum er det samme som arealet av lekkasjegrafen over et døgn. Lekkasjereduksjonen for hver modell er beregnet ved sammenligne med eksisterende lekkasjenivå.

Prising av lekkasje per kubikkmeter er tatt hensyn til vannproduksjon og tilhørende driftskostnader. Kostnader knyttet til innlekket drikkevann i avløpsnett er også betraktet i lekkasjekostnaden. (Norsk Vann, 2019) har foretatt kostnadsberegningen for nasjonalt nivå med antatt lekkasjetap på 29,8%. Vi har tatt utgangspunktet i dette datasettet og korrigert kostnadsberegningen slik at lekkasjeprisen samsvarer med lekkasjenivået i Oslo.

Lekkasjeprisen på 1,29 kr/m³ fra en rapport gjort av Asplan Viak for Vestfold Interkommunale vannverk, har blitt brukt til sammenligning (Kløve, 2010). Det er knyttet usikkerhet til prising slik at et estimat regnes som godt nok i dette caset.

Kostnader knyttet til drift er basert på den daglige situasjonen i Oslo VAV. Dette blir framlagt i resultatet.

Lekkasjekostnader knyttet til bruddforekomster er ikke blitt vurdert i dette caset. Dette vil bli drøftet senere.

3.2 Potensielle kritiske punkter

Fra teoridelen er som regel kritiske punkter lokalisert i høytliggende områder. I vårt tilfelle er nordre del av sonen omtrent 57 meter over nedre punkt. Disse punktene har en tendens til å ha lavere trykk, spesielt i perioder forbruket topper. I EPANET har vi brukt et tabellverktøy for å filtrere nodene etter forbruk ved klokken 07-08 og 18-20. Nodene med lavest trykknivå blir dermed identifisert. Deretter blir nodene kartlagt i sonen for å avdekke om det er flere utfordrende områder.

3.3 Installere Bermad 7PM og bestemme ventilinnstilling

I EPANET kan en mengderegulert ventil modellere som en GPV-ventil. Setting parameteren er en ventikurve som beskriver trykkfall som funksjon av vannføring (Rossman, 2000). Ved å endre på verdiene for trykkfall og vannføring kan ventilen styre etter gitte betingelser.

Ventilkurven modellert med fire punkter.

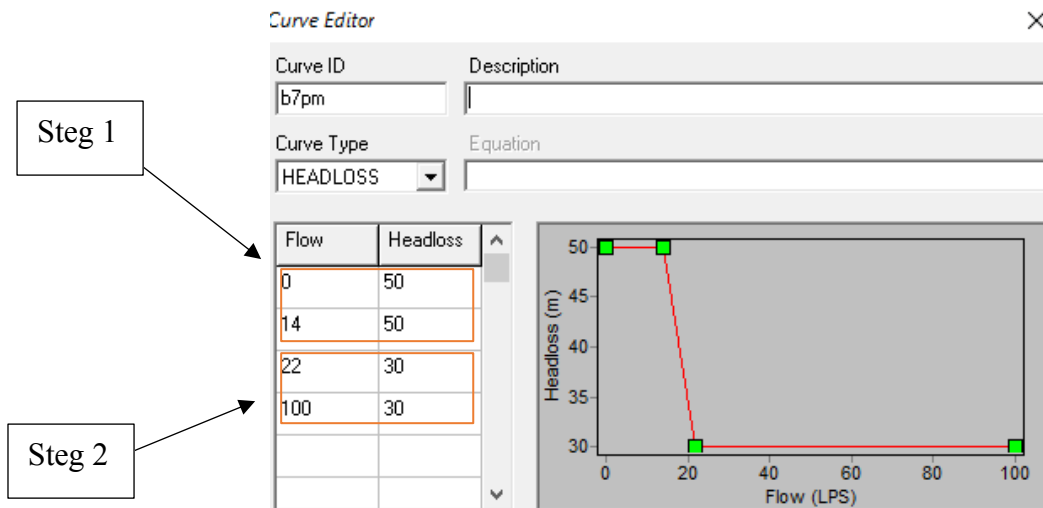
Trykkvariasjonen i kritisk punkt over døgnet legger grunnlinjen på hva som er akseptabelt driftsområde for trykk nedstrøms ventilen. Døgnforbruket i sonen er blitt anvendt for å bestemme tilhørende vannføringer ved maks- og minstetrykk. Det er blitt utformet flere ventilkurver for å observere effekten det har i sonen. Vi velger den ventilkurven passer systemet og kravene vi har fastsatt. Trykkstyringen er blitt gjort stegvis:

Steg 1: Bestemme styring på nattestid (00-06)

I perioder med lavt forbruk ønsker vi å senke trykket mest mulig samtidig ha et driftstrykk på 1 bar. Dette er betingelsen på hvor mye trykkfallet vi tillater i kritisk punkt. Videre bestemmer vi maksverdien for vannføringen kan ha med det foreslåtte trykkfallet.

Steg 2: Bestemme styring på dagtid (07-utover)

Ved maks forbruk ønsker vi et driftstrykk minst leverer 2 bar. Følgelig skal trykkfallet korrespondere med minstekravet. Trykkfallet skal gjelde for vannføringer over gjennomsnittsverdien over døgnet.



Figur 21: Eksempel på ventilkurve i EPANET

3.4 utfordringer med pumpestasjon

I Mike Urban benyttes frekvensomformere til å turtallstyre pumpen. Pumpehastigheten selvregulerer innen gitte styringsbetingelser for å bevare et kontrolltrykk for en node nedstrøms (DHI, 2017). I den opprinnelige modellen er innstillingene:

Control pressure: 112.5

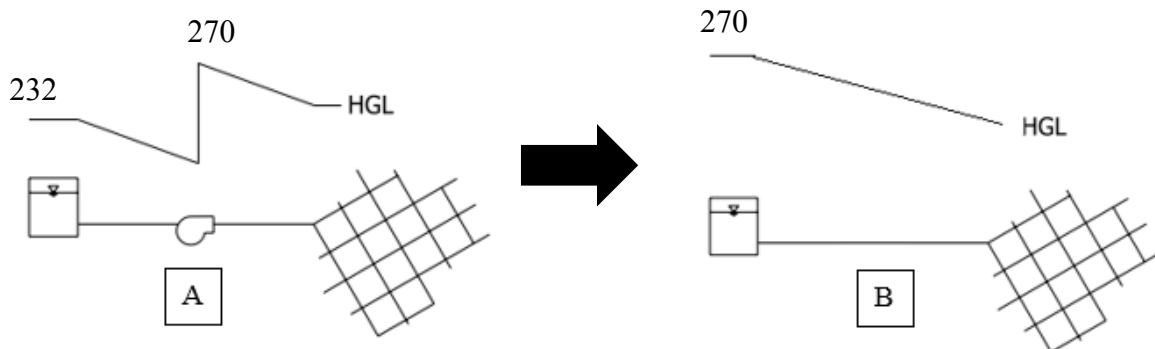
Minimum pump speed: 0.2

Maximum pump speed: 1.0

Sammenlignet med Mike Urban, er det begrensninger knyttet til frekvensomformere med EPANETs brukergrensesnitt. I EPANET er det mulig å bestemme fast pumpehastighet så det drifter en prosentandel av maksimaldrift. Fra vedlegg: Pumpekarakterstikk for VP10 opererer pumpen på rundt 65-70 % av maksimaldrift ved bruk av affinitetsloven. Erfaringsmessig er ikke pumpehastigheten konstant da den kontinuerlig endrer i takt for å opprettholde kontrolltrykket. Det er mulig å styre pumpehastigheten med «control»-funksjonen på EPANET for forskjellige tidspunkter og trykkbetingelser, men det er heller ikke optimalt.

Ved å forutsette at pumpen til enhver tid klarer å opprettholde tiltenkt HGL på 270, vil det være mulig å erstatte det med et reservoar som gjør den samme nytten. Denne antagelsen samsvarer med VAVs måte å drifte pumpestasjon på. Derved blir vannspeilet i reservoaret VP10 innstilt til 270 moh. For å validere metoden, ble det målt et kontrolltrykk i en node

nedstrøms reservoaret til 110,03 mVS som er tilnærmet lik verdien fra Mike Urban. Metoden betraktes som fullverdig erstatter for pumpen.



Figur 22: A) Pumpas løftehøyde gir HGL B) Vannspeil sørger for HGL. Modifisert versjon av (Walski et al., 2003, s.100)

3.5 Nødvendig modelleringsteknikk

Det er nødvendig å installere tilbakeslagsventiler på overføringsledningene for å forhindre uønskede vannstrømninger til reservoarene i RK55 og VP10. I EPANET kalles disse for «check valve» som er en egenskap tilordnet en ledning. I noen tilfeller har det vært behov å omtegne ledningene da tilbakeslagsventilene virket i feil retning.

3.6 Funksjonstester

I funksjonsanalyse vil sonen bli utsatt for brannuttak og stengte elementer. Hensikten er å undersøke hvordan sonen vil respondere på disse endringene for ulike ventiler. I analysen vil den eksisterende ventilen blir benyttet som en referansemodell.

Følsomhetsanalysen i dette caset er todelt:

- 1) Ensidig vannforsyning – Pumpestasjonen er ikke i bruk. Det betyr at den eneste vannleveransen til sonen er gjennom ventilen i RK55.
- 2) Tosidig vannforsyning – Pumpestasjonen/reservoar er i bruk.

3.6.1 Konservativ tilnærming

Da dette caset har tre modeller med tilhørende lekkasjeeksponenter, vil utførelse av separerte følsomhetsanalyser være tidskrevende. Én funksjonstest vil bestå av to branntilfeller i døgnet for hver analysenode, ekskludert scenarioer med stengte ledninger. Dessuten skal analysen utføre for tosidig vannforsyning for alle ventilene. Dette utgjør et omfang på 72 simuleringer for én modell. Det er et behov for forenkling og den naturlige fremgangsmåte er å velge den modellen som gir lavest brannvannskapasitet. På denne måten forsikrer vi oss om at minstekravet er oppfylt. I forkant av analysen, vil det bli utført en stikkanalyse som avgjør hvilken modell som blir funksjonstestet.

3.6.2 Reparasjon- og vedlikeholdsarbeid på ledning

I dette caset vil stengte ledninger (elementer) simulere et reparasjons- eller vedlikeholdsarbeid som har en varighet på et døgn. Det forutsetter ingen vanntap i denne prosessen.

Scenario 1 – ledning 248592: Langs sørsiden i sonen ligger hovedledning på 200 mm. Denne anses som kritisk og velger ledningen 248592 som befinner seg midt i strekningen mellom RK55 og VP10.

Scenario 2 - ledning 368184: En kritisk ledning på 200 mm som er nært tilkoblet til vannforsyningen fra RK55. Stenger denne ledningen kun ved brann i leilighetsområde og i fase 3 med tosidig forsyning.

Scenario 3 – ledning 260175: Kritisk ledning på 300 mm og sørger for hovedleveranse fra VP10. Benyttes kun i fase 3.

3.6.3 Brann

I EPANET er brannuttaket installert som «base demand» i en node. Brannvann er dermed forbruksstyrt og ikke trykkdrevet som vi ønsker det skal være. Den hydrauliske motoren i EPANET antar at etterspørselen etter brannvann er konstant og beregner trykket i noden som tilfredsstiller etterspørselen, uavhengig av resttrykket i noden. Med andre ord vil brannvanntapp (etterspørselen) få tilført ønsket vannmengde selv om trykket i noden er veldig lav eller negativt. Denne måten å gjøre det på er OK hvis resttrykket i noden er mer enn 10 mVS. Når resttrykket nærmer seg denne grensen, vil resultatet være mindre nøyaktig og bør ikke stoles på. Dette er en svakhet i modellen.

Det er et internt krav i VAV med resttrykk på 20 mVS i branntilfelle (Oslo VAV, 2015b). Dette gjelder for så vidt ved dimensjonering av fremtidig ledningsnett med tanke på byutvikling og ønske om robustsikker vannleveranse. I denne oppgaven vil det være tilstrekkelig med resttrykkkrav på 10 mVS ved brannvannuttapp. Ved høyt resttrykkkrav vil en ikke se det maksimale potensialet ved trykknedsenking som oppgaven dreier seg om. Det forutsetter at ledningsnettets oppfører seg normalt utenom brann.

I brannanalysen er det simulert brannuttak på nattes- og ettermiddagstid. Hensikten er å observere hvordan sonen responderer under lavt og høyt tilgjengelig vannforbruk med brannvann. I modellen er det bestemt at et branntilfelle varer fire timer sammenhengende.

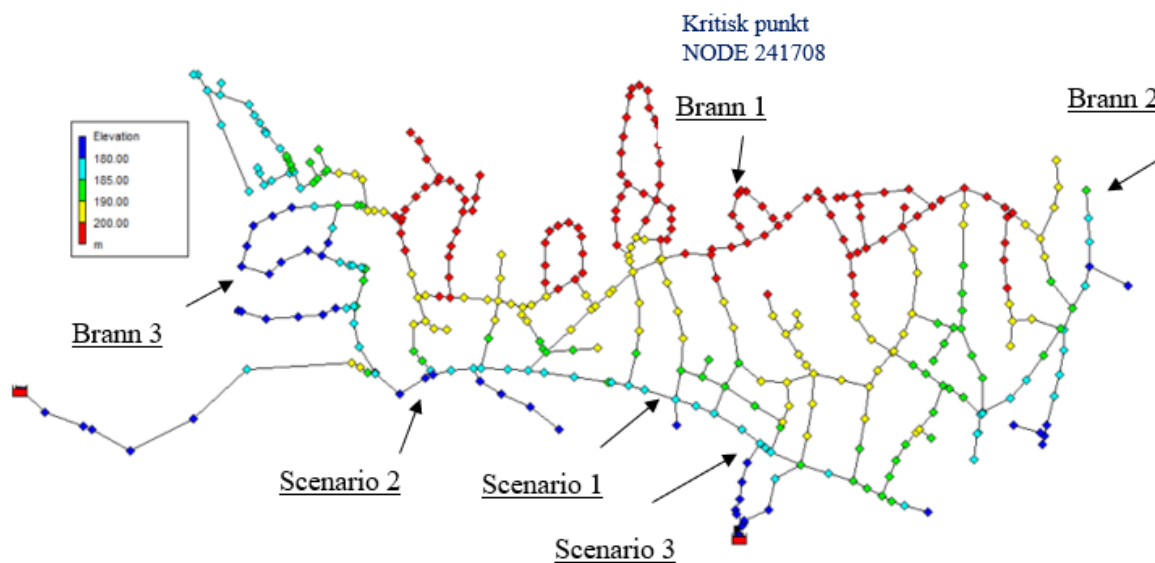
Tidspunkt på brannuttak.

Natt – klokken 01-05.

Ettermiddag – klokken 15-19.

Det er to metoder å kontrollere om sonen tilfredsstiller kravet om brannvannuttapp:

- 1) Via trykk: Gitt resttrykk 10 mVS, sjekk tilgjengelig brannvannkapasitet i noden branntilfellet foregår.
- 2) Via mengde: Legg inn ønsket mengde brannuttak og sjekk om tilgjengelig resttrykk overholder 10 mVS.



Figur 23: Kart over hvor scenarioene befinner seg i sonen

Forklaring på brannanalyse:

Brann 1: Kritisk punkt

I dette området ligger det småhus slik at brannvann tapp i utgangspunktet bør ligge på minst 20 l/s.

Brann 2: Småhusbebyggelse (node lengst unna)

Brann i en node lengst unna vannforsyningen fra RK55. Dette området er preget av småhus. Brannvann tapp på 20 l/s blir installert.

Brann 3: Leilighetspreget område

Det valgte området er preget av høye leiligheter. Det er ønskelig å installere 50 l/s til slokkevann.

FASE 1: Ensidig vannforsyning:

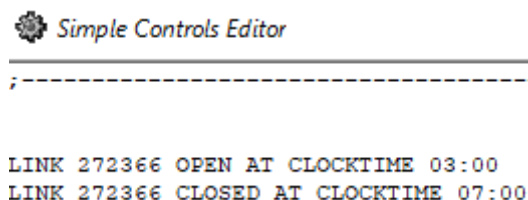
I fase 1 er brannanalyse gjort for både nattes- og ettermiddagstid. Dette er for å se variasjonen i brannvannkapasitet i løpet av dagen.

FASE 2: Ensidig vannforsyning med stengte ledninger:

Gjentar fase 1 med scenario 1. Brann skal kun forekomme i ettermiddagstid. Brann i leilighetsområde skal utføre med scenario 2.

FASE 3: Tosidig vannforsyning med stengte ledninger:

I fase 3 skal brannanalysen gjenta fase 2 med scenario 2 og 3. Det er kun aktuelt å analysere effekten av brann på ettermiddagstid. Sonen skal ta i bruk reservoaret og utføre med tosidig vannforsyning. For å aktivere vannforsyningen fra VP10 ble det tatt i bruk enkle styringsregler i form av åpne og lukking av nærliggende overføringsledning.



Simple Controls Editor

LINK 272366 OPEN AT CLOCKTIME 03:00
LINK 272366 CLOSED AT CLOCKTIME 07:00

Figur 24: Styringsregler for VP10 fra EPANET

4. Resultat

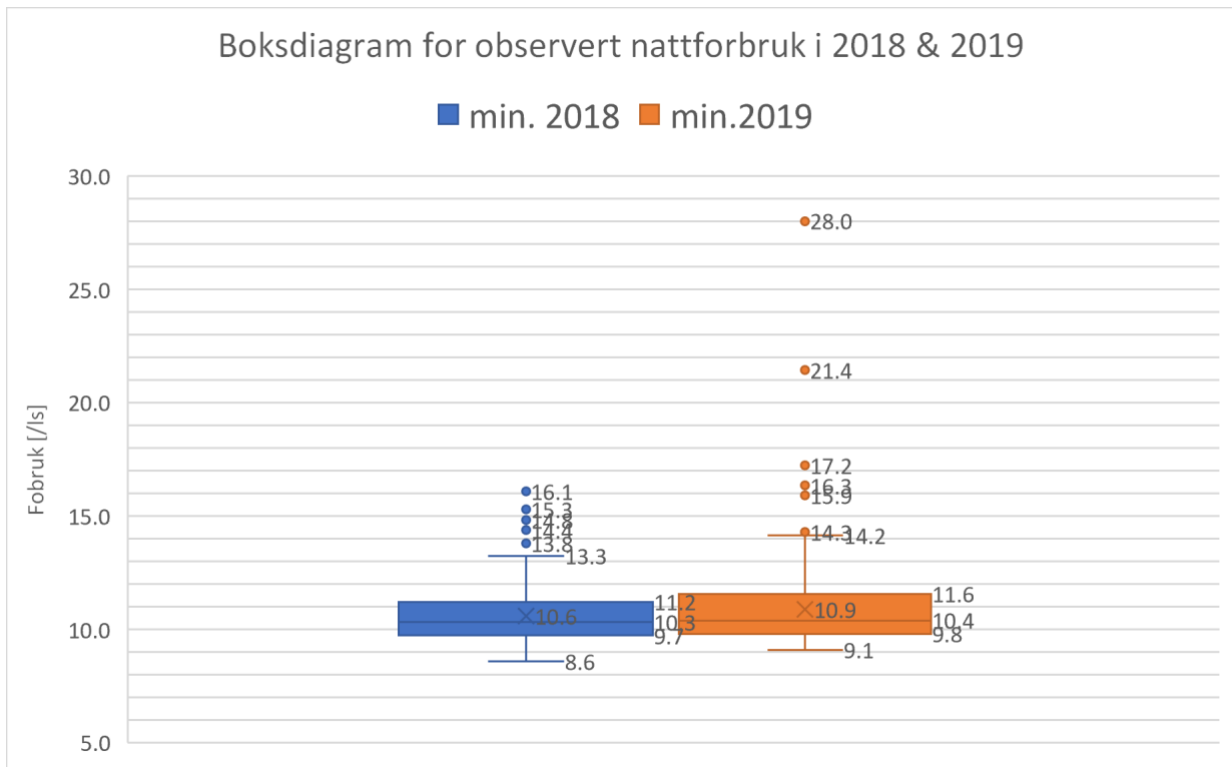
Resultatkapitlet er delt opp i fire. En foranalyse, tilstandsanalyse, funksjonstest og økonomisk analyse.

4.1 Foranalyse

Foranalyse er forløperen til tilstandsanalysen. Her vil det bli presentert kort om observert nattforbruk, kritiske punkter og ventilkurver. Det vil bli en gjennomgang av hvordan styringsreglene er blitt bestemt, og redegjort hvilken ventilkurve som blir med videre i analyse.

4.1.1 Analysere av observert nattforbruk med boksdiagram

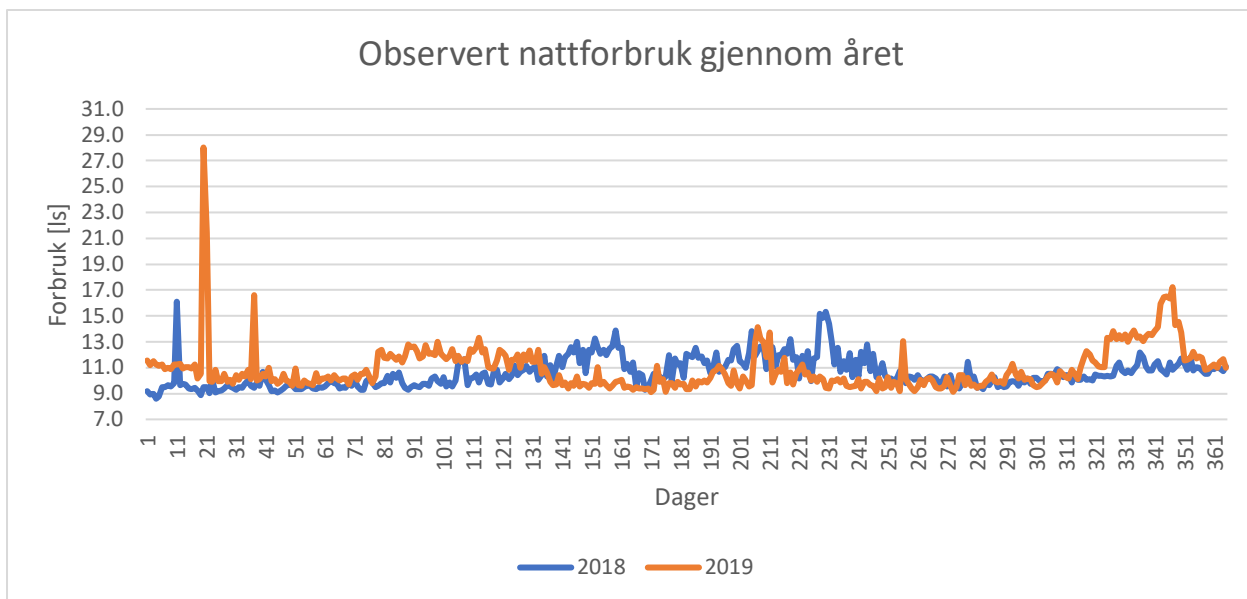
Boksdiagrammet viser variasjonen i observert minsteforbruk for hvert døgn de to siste årene. Medianverdien for forbruket henholdsvis 10,3 og 10,4 l/s for sine respektive år. Gjennomsnittsverdiene er vist inni boksen. Ut fra datasettet er minste nattforbruket lavere i 2018. Verdiene viser lite tendenser til sprik. I 2019 er ekstreme verdier mer synlig som vi belyste tidlig i caset. Variasjonen i nattforbruket viser større spredning. Vi observerer at mesteparten av minsteverdiene ligger mellom intervallet 9,7-11,2 l/s for år 2018 og 9,8-11,6 l/s for år 2019.



Figur 25: Boksdigram av observert nattforbruk for 2018 & 2019

4.1.2 Observert nattforbruk gjennom året

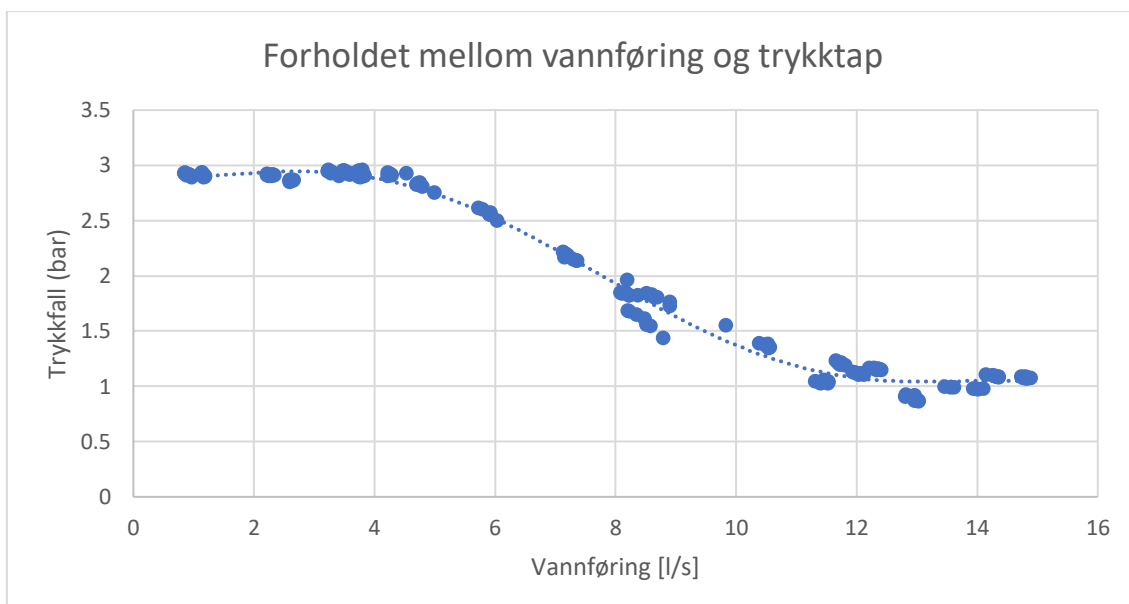
Observert nattforbruk i sonen blir framstilt med hensikt på å se forbruksvariasjon over ulike årstider. I sommerperioden virker natteforbruket å være mer stabil i 2019. For samme periode i 2018 er forbruket og tyder på en varm sommer.



Figur 26: Observervt nattforbruk gjennom året

4.1.3 Forholdet mellom vannføring og trykktap for ventilen Bermad

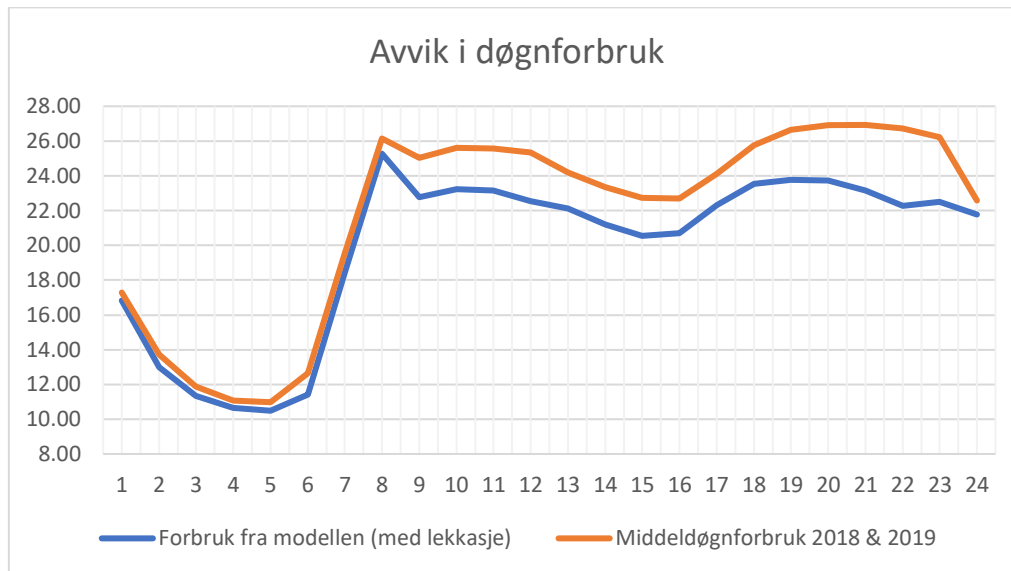
Ventilkarakteristikken til Bermad er observert å være lineær. Figur 27 viser at ved vannføring 0-4,0 l/s vil trykkfallet være på 3 bar. For vannføring større enn 10,0 l/s er tillat trykkfall regulert til 1 bar.



Figur 27: Sammenheng mellom trykkfall og utløpsvannføring for ventilen

4.1.4 Avvik i døgnforbruket

Figur 28 viser avviket i døgnforbruket fra modellen og observert middelforbruk i 2018/2019. Kalibreringsarbeidet i metoden har forsøkt å jevne ut denne forskjellen. Tabellen som viser avvikene under kalibreringen ligger som vedlegg.



Figur 28: Avvik i døgnforbruk

4.1.5 Identifisere potensielle kritiske punkter (KP) ved observert trykknivå

Kjennskap til trykknivået og hvor KP'er befinner seg er nødvendig for å bestemme driftsområdet til Bermad.

viser potensielle KP'er ved maksforbruk. I vårt tilfelle må KP være hos et abonnement, altså en forbruksnode. Lekkasjenodene blir dermed ikke vurdert som KP.

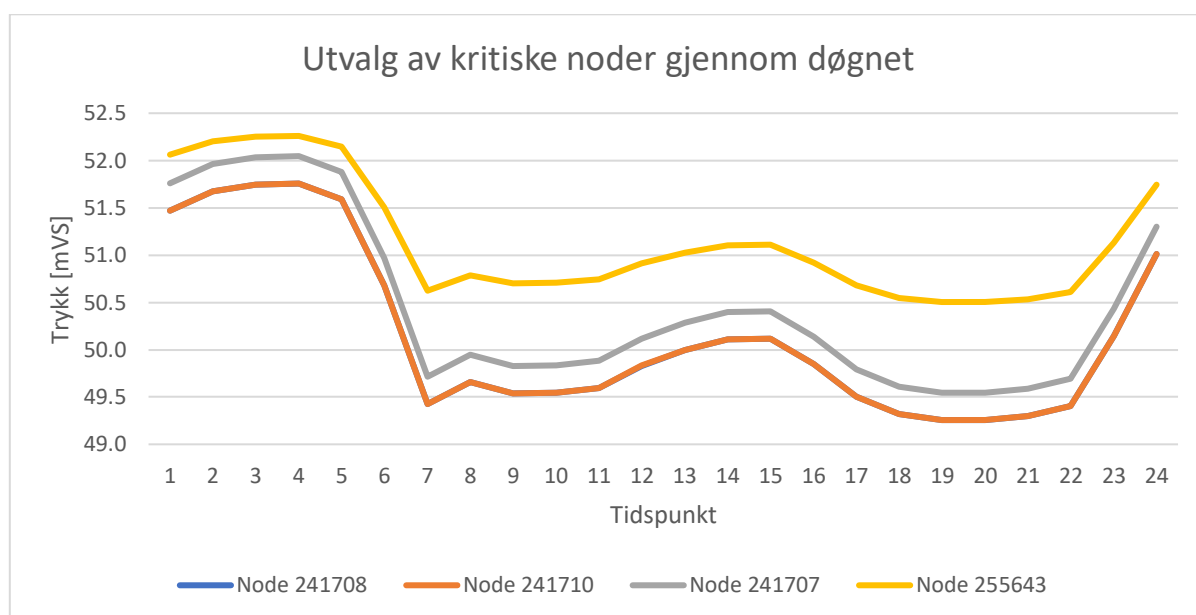
Tabell 2: Potensielle KP'er

Minste trykknivå ved høyt forbruk i sonen (Grå = lekkasjenoder)							
Høyde [m]	Node	Forbruk [l/s]	kl 7	kl 8	kl 18	kl 19	kl 20
215.7	241712	0.068750	50.9	51.2	50.8	50.8	51.2
215.8	255645	0.015708	51.8	51.9	51.7	51.7	51.9
216.4	255678	0.002083	51.2	51.3	51.1	51.0	51.3
216.9	255643	0.022917	50.6	50.8	50.6	50.5	50.8
216.9	241707	0.064583	49.7	50.0	49.6	49.6	50.0

217.2	271024	0.015708	50.4	50.5	50.3	50.2	50.5
217.2	241708	0.058333	49.4	49.7	49.3	49.3	49.7
217.2	241710	0.022917	49.4	49.7	49.3	49.3	49.7
217.7	243208	0.015708	49.8	50.0	49.7	49.7	50.0

Fra Tabell 2

blir fire utvalgte noder sammenstilt med hverandre. Figur 29 viser trykknivået gjennom døgnet. Node 241708 og 241710 har lavest trykknivå. Disse nodene ligger i nærheten av hverandre, slik at det ikke har stor betydning hvilke punkter vi velger som KP. I dette caset har vi valgt node 241708 som KP.



Figur 29: Utvalg av KP'er gjennom døgnet

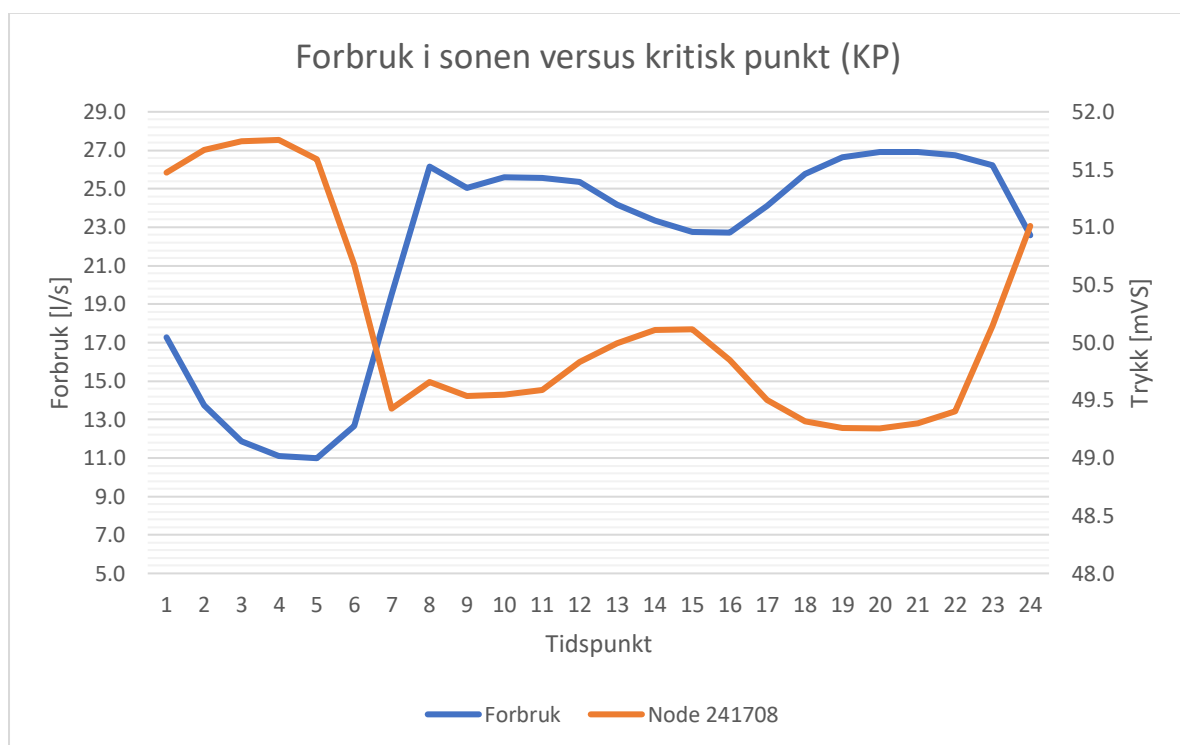
4.1.6 Gjennomgang av ventilkurve

Figur 30 viser sammenheng mellom trykk i KP og døgnforbruket i sonen med opprinnelig ventilen. Fra teoridelen er det nødvendig å vite hvordan trykket i KP varierer utover døgnet

for å bestemme ventilkurven. Det er viktig å finne driftsområdet på utløpstrykk tilfredsstillende trykknivået i KP og ikke fastsette unødige trykkstyring.

Fra Figur 30 ser vi at trykket i KP ikke varierer like mye som først antatt med en konvensjonell TRV. Trykknivået for KP er den laveste i sonen og er innenfor akseptabel grense på 20-60 mVS.. Det gir signaler om at trykkstyring ikke nødvendigvis har høy effekt i sonen. Dette må i så fall vurderes opp med overskuddstrykket som befinner seg ellers i sonen.

Bestemme nedre og øvre grense på trykkfall i KP er enklere jobb enn å bestemme hvilke vannføringer disse betingelsene skal gjelde for. Det som kommer til å skille ventilkurvene er valg av vannføringsverdier/forbruk med tilhørende maks- og min utløpstrykk.



Figur 30: Trykk i kritisk punkt med totalforbruket i sonen

Som nevnt i metoddelen bør ventillinnstillingen ta stilling til døgnforbruket. På nattetid er trykket i KP observert 49,5 – 52 mVS (se Figur 30). Tabell 3 viser tre nedre ventillinnstillinger og reduksjonspotensialet i KP. Trykkfallet skal være på et nivå som tilfredsstillende minstetrykket på 10 mVS. Det er ikke aktuelt med trykkfall høyere enn 42 mVS da minstekravet ikke blir oppfylt. Et trykkfall på 41 mVS er en god løsning da det gir lavest minste nattforbruk samtidig som trykket i KP er over minstekravet. Når det er sagt er, har vi velger vi trykkfall på 40 mVS. Grunnen er at vi ønsker en ørliten sikkerhetsmargin.

Tabell 3: Trykkfall ved lavt forbruk

Trykkfall [mVS]	Minste nattforbruk [l/s]	Nattes trykk, KP [mVS]
40	8.7	11.5
41	8.7	10.5
42	8.6	9.5

Makstrykket i KP skal i utgangspunktet være minst 20 mVS etter krav. I dette caset vil ikke være hensiktsmessig å fastsette høyt makstrykk enn nødvendig da lekkasjeandelen øker proporsjonalt med trykk.

viser potensielle trykkfall vi kan tillate ved maksforbruk i sonen. Trykkfall på 30 mVS er innstillingen vi tar med videre i analysen.

Tabell 4: Trykkfall ved høyt forbruk

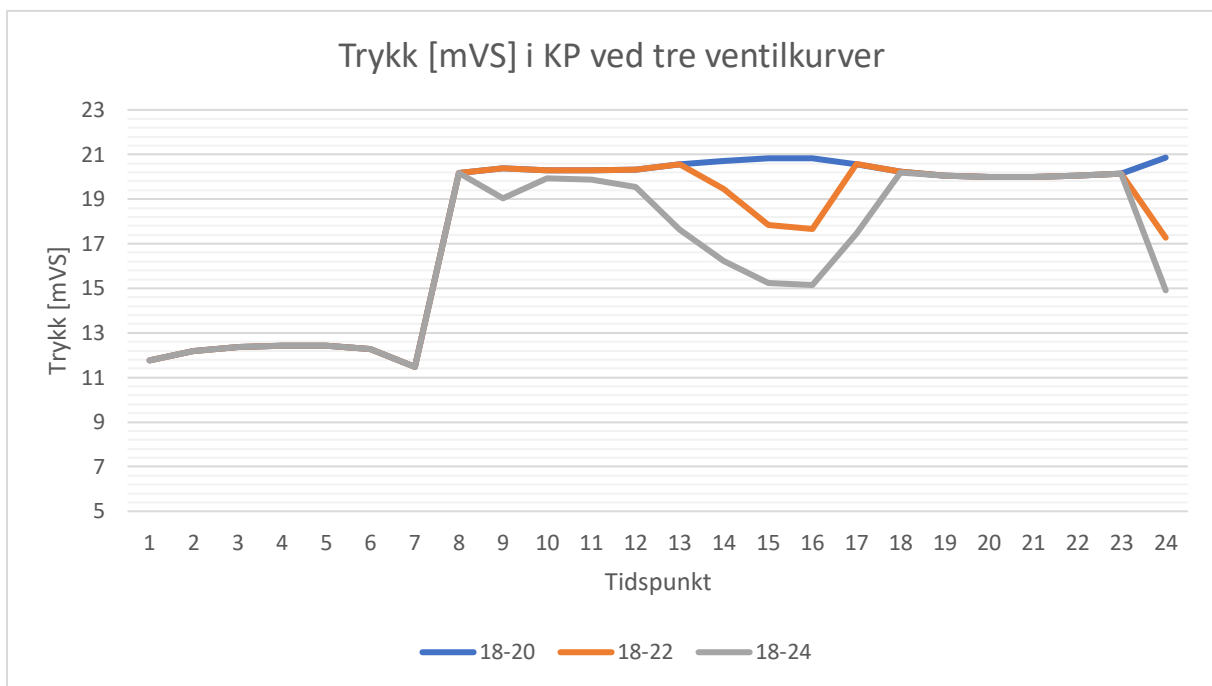
Trykkfall [mVS]	Minste nattforbruk [l/s]	Natt/trykk KP mVS]
32	Upåvirket	18.6
30	Upåvirket	20.6
25	Upåvirket	21.5

På nattetid er forbruket observert å være lavest på 11-18 l/s til klokken 07:00. Vi ønsker at ventilen respondere med trykkfall på 40 mVS for forbruk mindre enn 18 l/s. Dersom vi hadde valgt en lavere forbruksgrense, for eksempel 13 l/s, vil ventilen svare med å øke trykket i sonen mye tidligere på dagen. Det positive ved dette er at ventilen er mer sensitiv for forbruksendring. Det negative er at trykkøkningen ikke er strengt talt nødvendig med tanke på lekkasjeproblematikken. I dette tilfelle velger vi 18 l/s som er overgangen fra min- og maksforbruk.

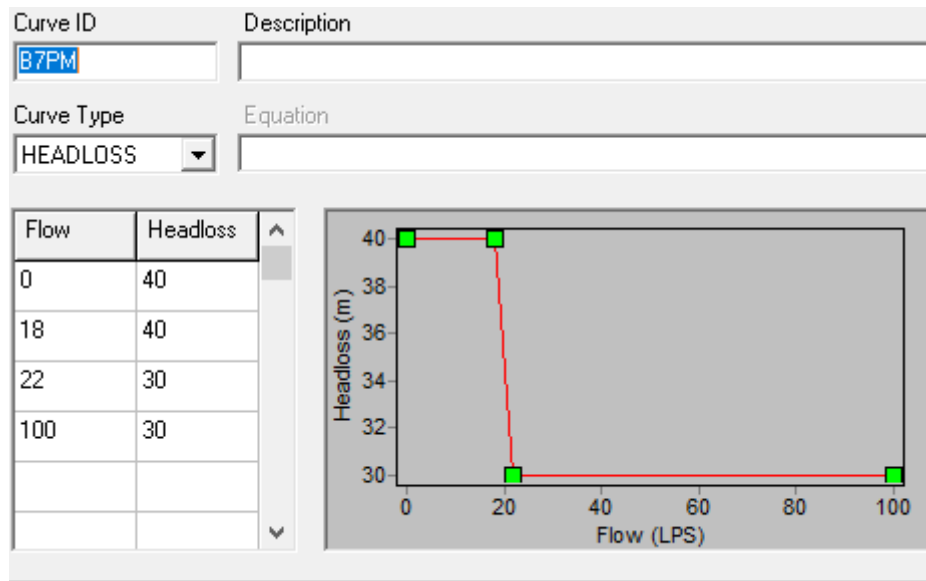
Nå gjenstår det å velge for hvilke forbruk et trykkfall på 30 mVS skal gjelde. Figur 31 viser tre potensielle ventilkurver gitt 18 l/s som nedre forbruksgrense. Fra klokken 08:00 er forbruket over 20 l/s. Med denne innstillingen vil ventilen sørger for å holde trykknivået konstant i KP utover dagen. Det er ikke fornuftig innstilling da vi ikke utnytter potensialet med en mengderegulert ventil. Det åpenbart at en innstilling med høyere forbruksgrense er bedre til å respondere på forbruksendring. I dette caset har vi valgt at trykkfallet på 30 mVS skal gjelde for forbruk over gjennomsnittsverdien i sonen som er omtrent 22 l/s.

Figur 31 viser tre alternativer til ventilkurve. Alle ventilkurvene har samme innstilling på 18 l/s ved lavt forbruk. Forskjellen mellom ventilkurvene hvilke vannføringer utløpstrykket skal gjelde for

Figur 31: Trykk [mVS] i KP ved tre ventilkurver



Figur 31: Trykk [mVS] i KP ved tre ventilkurver



Figur 32: Endelig ventikurve i Bermad

4.2 Tilstandsanalyse

Tilstandsanalysen skal ta høyde for normalsituasjon i sonen med kun ensidig vannforsyning fra RK55. I denne sammenhengen vil den eksisterende ventilen bli sammenlignet med ventilalternativene våre. Presentasjonen starter fra et overordnet nivå med grafisk framstilling. Fokuset er rettet for tidspunkt 07:00 og 04:00 for å vise variasjon i trykknivå. Framstillingen er tatt i utgangspunktet av lekkasjeeksponent $N1 = 0.5$

Deretter går analysen fokusere på potensiell lekkasjereduksjon for utvalgte N1-vedier fra metode-delen.

I tilstandsanalysen blir disse forkortelse benyttet:

90-TRV: Opprinnelig trykkreduksjonsventil med 90 mVS nedstrøms trykk

65-TRV: Trykkreduksjonsventil med 65 mVS nedstrøm trykk.

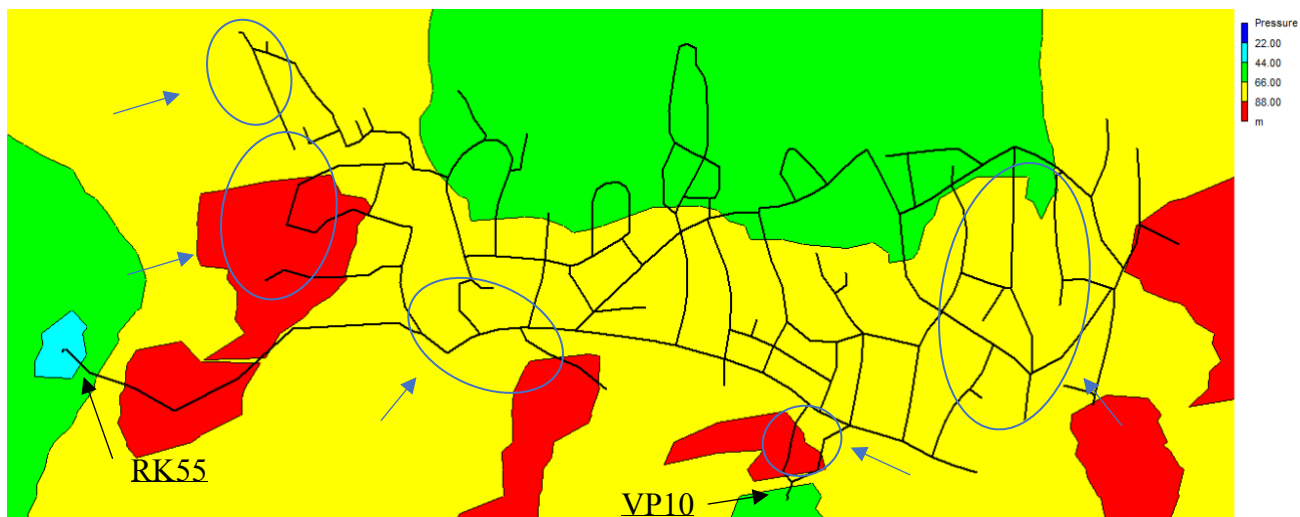
4.2.1 Trykkbilde i sonen

En grafisk framstilling blir presentert for hver ventil for valgte tidspunkter. Vi har unnlatt å kommentere figurene ved natteetid.

Trykk i sonen klokken 07:00

90-TRV

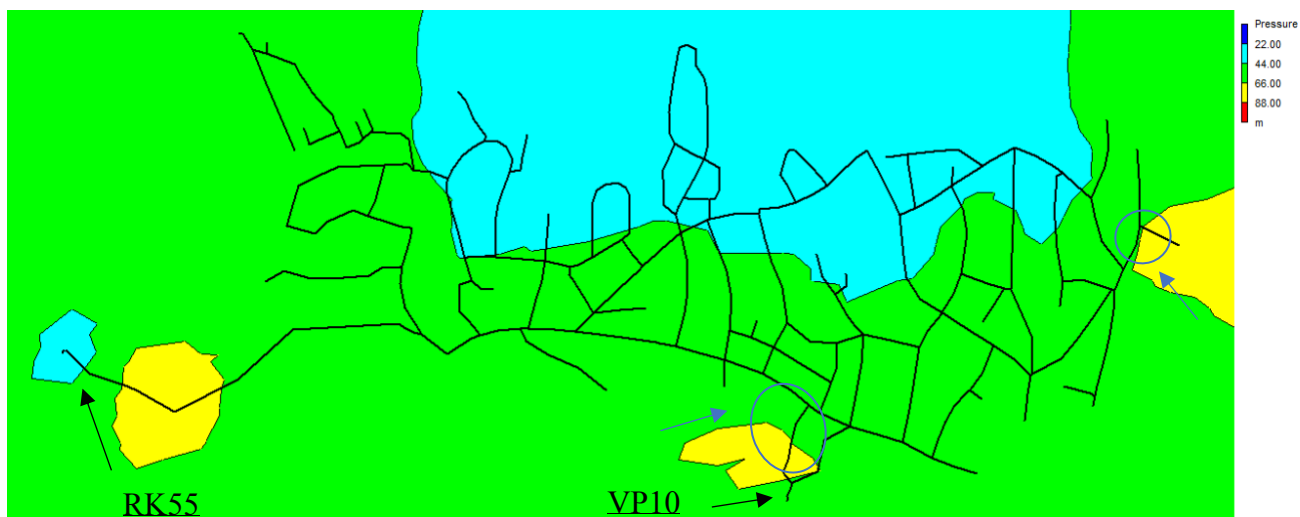
Med den eksisterende ventilen er trykket i sonen uønsket høyt. Det er spesielt de sirkulerte områdene trykket er nærmest 80 mVS. Sirkulert område ved VP10 opplever trykknivå over 90 mVS. Dette er for så vidt greit da det dreier seg om en 400 mm ledning. Langs hovedledningen på sørsiden av sonen er trykket rundt 82 mVS. Forfatteren er klar over at observert trykknivå er ugunstig høyt for store deler av sonen og er bekymringsverdige. Det råder spørsmål om usikkerhet knyttet til modellen og om den gjenspeiler virkelig situasjon. Likevel er vår oppfatning å senke nedstrøms trykk en naturlig og nødvendig tilnærming.



Figur 33: Trykkbilde med 90-TRV – 07:00

65-TRV

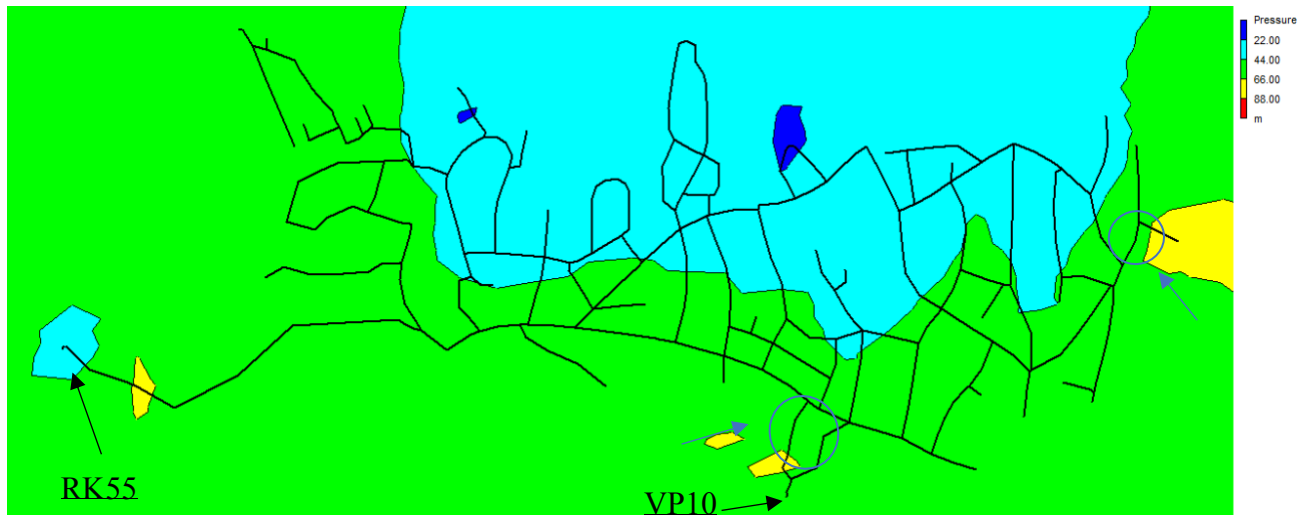
Konvensjonell TRV med nedstrøms trykk på 65 mVS reduserer trykknivået betraktelig i sonen. Store deler av sonen har trykknivå i intervallet mellom 44-66 mVS samtidig som trykket i KP over akseptabelt nivå. Resultatet er mer stabilt og jevnere trykkfordeling i sonen. Sirkulerte områder viser de få unntakene der trykket er 70-80 mVS. Trykk i nodene langs hovedledningen har falt til 59 mVS. Det er 20 mVS lavere enn ved 90-TRV.



Figur 34: Trykkbilde med 65-TRV – 07:00

Bermad

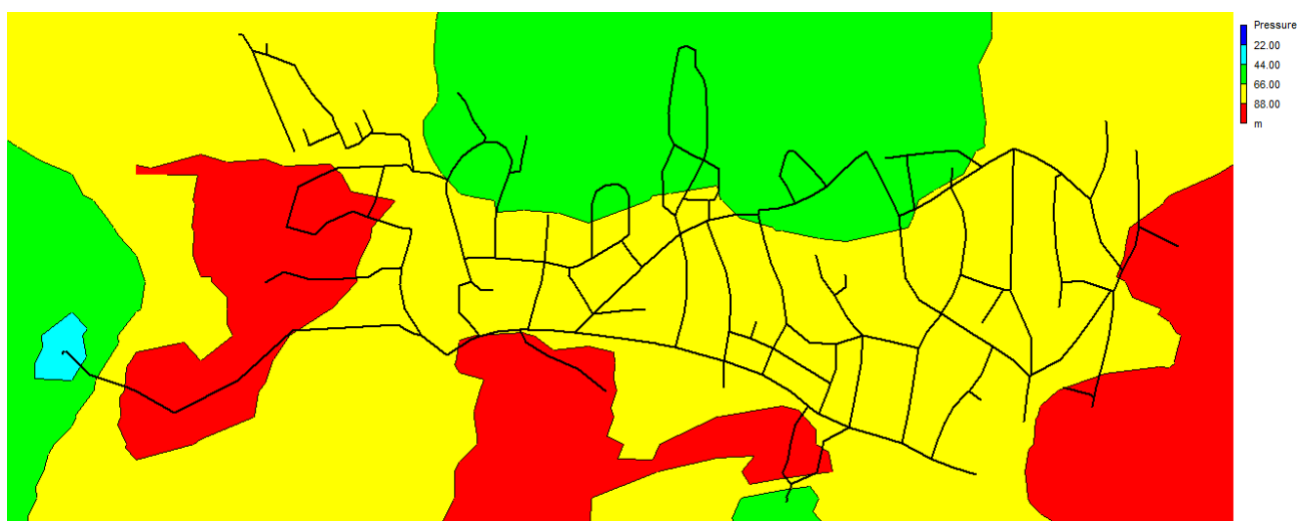
Med Bermad er trykkfordelingen i sonen jevn og stabil. For noen områder kan trykknivået være nærmest 20 mVS men ikke lavere. Dette gjelder i området der kritisk punkt ligger. Resten av sonen har et trykknivå mellom 20-0 mVS. Nodene langs hovedledningen på sørsiden opplever trykk på 55 mVS som tilsvarer 33 % og 6,7 % reduksjon sammenlignet med 90-TRV og 60-TRV. Det er en signifikant forskjell sammenlignet med 90-TRV.



Figur 35: Trykkbilde med Bermad - 07:00

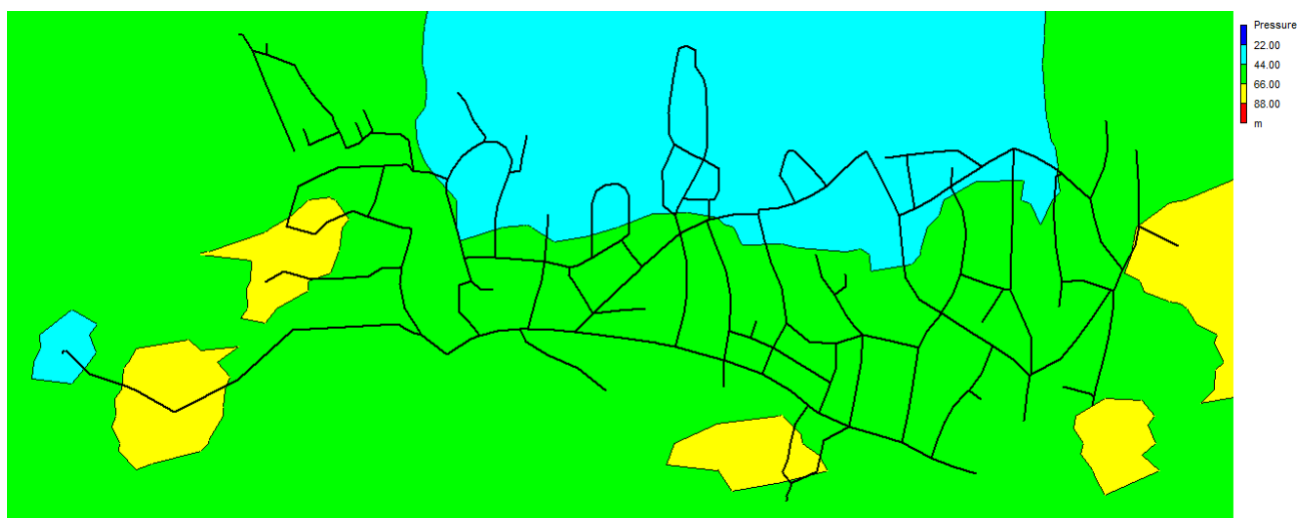
Trykk i sonen klokken 04:00

90-TRV



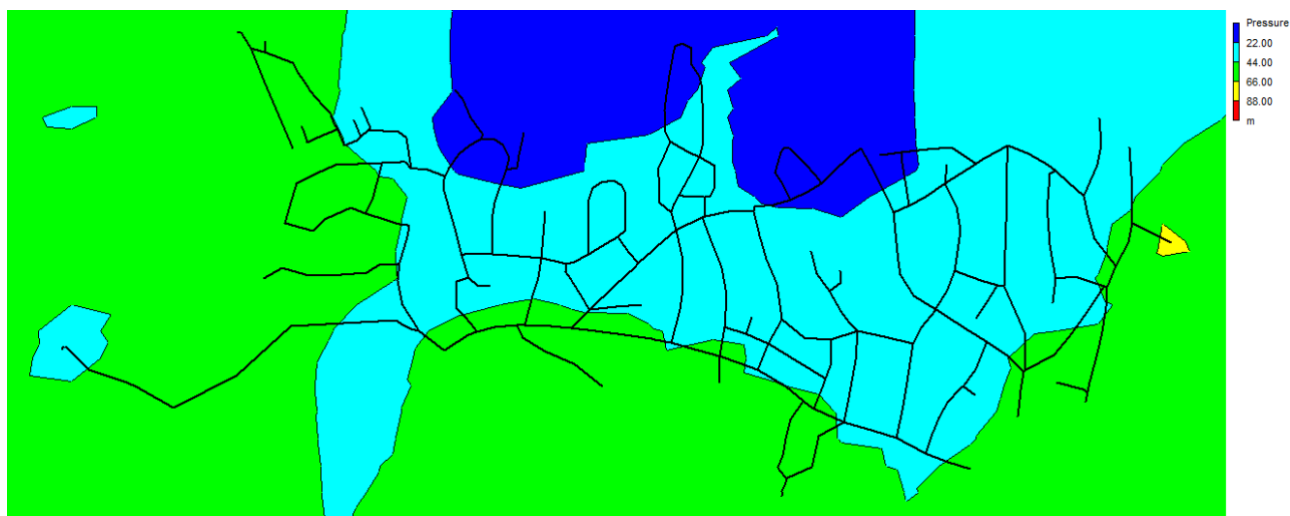
Figur 36: Trykkbilde med 90-TRV - 04:00

65-TRV



Figur 37: Trykkbilde med 65-TRV - 04:00

Bermad



Figur 38: Trykkbilde med Bermad - 04:00

4.2.2 Trykknivå i hver node

Det er aktuelt å observere hvordan trykknivået i hver node forholder seg til tilgjengelig trykk i sonen. Nodene er presentert i x-aksen med tilhørende trykkverdi i y-aksen. Ventilene er markert med sine respektive farger. Vi har valgt å vise snittforbruket per time i

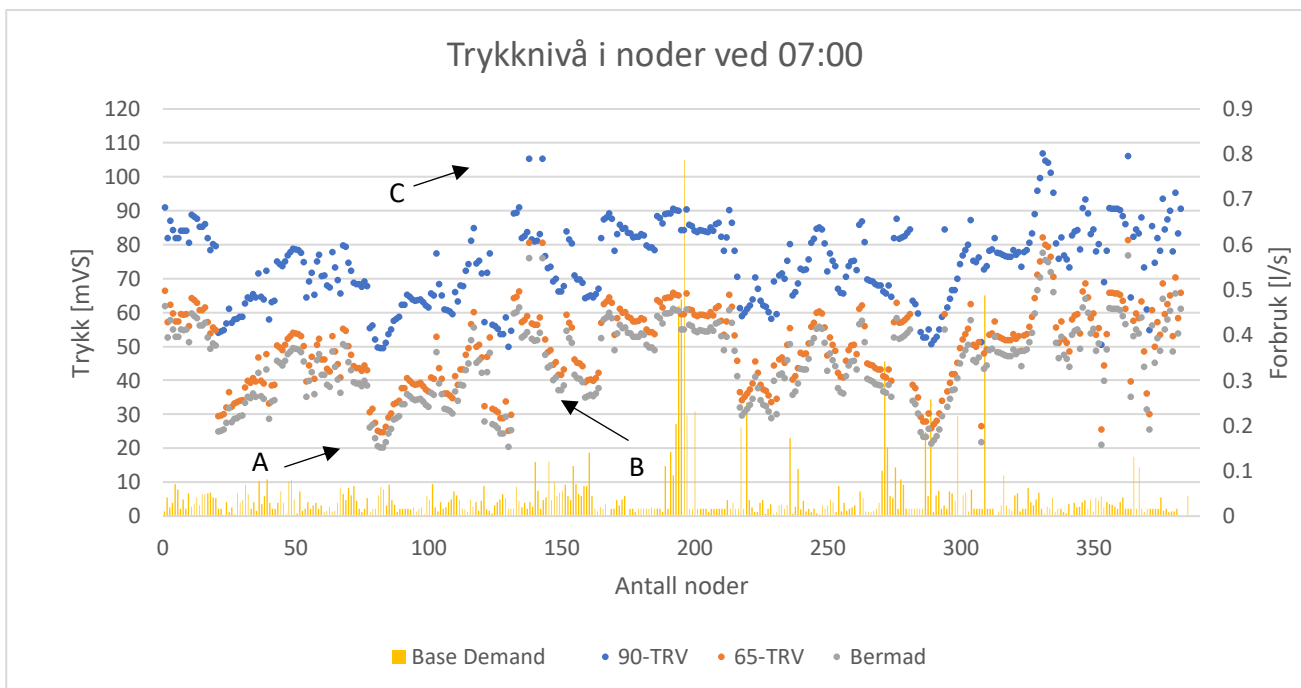
sekundæraksen fordi det blir uoversiktlig med å inkludere forbruk for hver modell. Derfor er forbruk ukorrigert med timesforbruket. Trykkverdiene er bevisst vist i y-aksen da det er intuitivt å avlese trykk fra venstre side i denne grafen. I Figur 39/40 er A = KP, B = node lengst unna RK55, C = hovedledning.

Avvik i trykknivå mellom tidspunktene:

90-TRV og 60-TRV: Trykknivået virket lite påvirket av forbruksvariasjon, blant annet er trykk i KP tilnærmet konstant. Mer om dette senere resultatet.

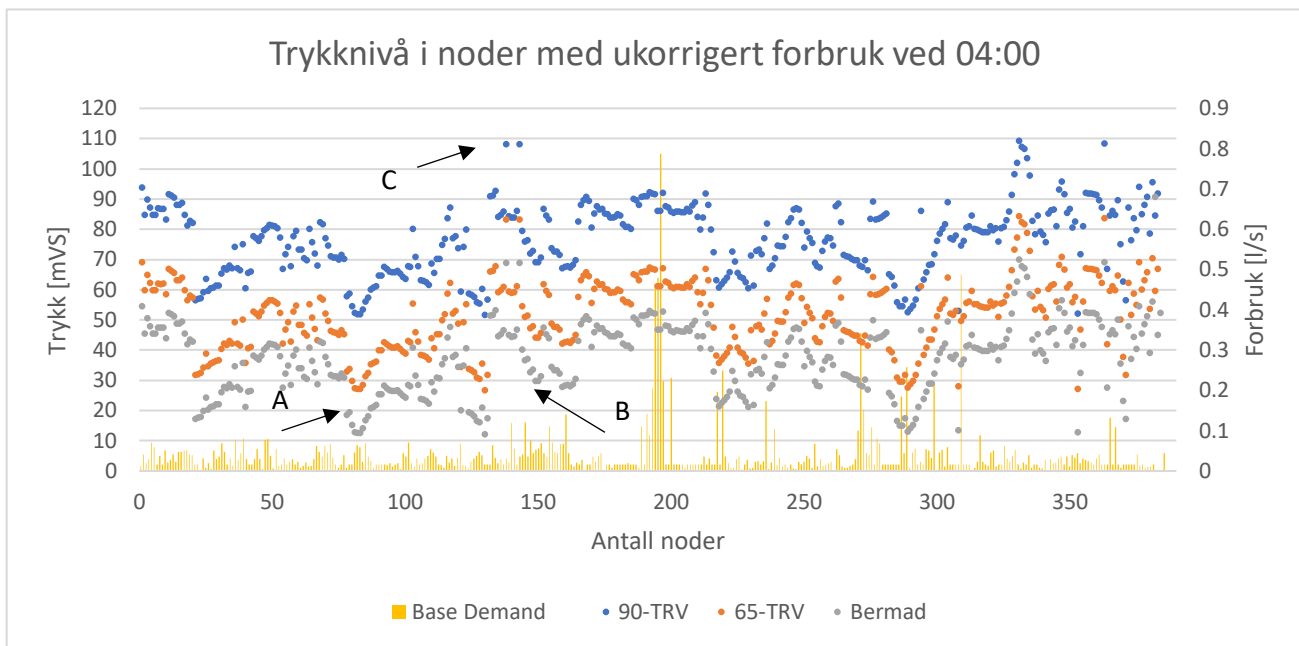
Bermad: Siden ventilkurven er dimensjonert etter KP, vil resterende noder oppleve tilsvarende falltap. Ingen noder er observert under 20 mVS klokken 07:00. Ved minimalt forbruk, klokken 04:00, i sonen er minstetrykk 10 mVS opprettholdt. På nattetid vises det tydelig forskjell i trykknivå mellom Bermad og konvensjonelle TRV'er.

Trykk i nodene klokken 07:00



Figur 39: Trykknivå i nodene med ukorrigert forbruk ved klokken 07:00

Trykk i nodene klokken 04:00



Figur 40: Trykknivå i nodene med ukorrigert forbruk ved klokken 04:00

4.2.3 Tidsstemplet trykk for sonen, kritisk punkt (KP) og node lengst unna

Tabell 5 viser trykkverdier for sonen, KP og en node lengst unna. Med konvensjonelle TRV er trykknivået relativt jevnt uavhengig av tidspunkt.

Sonen har et trykknivå 37-45 mVS med Bermad avhengig av tid. KP har minsteverdi på 12,4 mVS og maksimalt 24,4 mVS. Trykknivået i lengst liggende node er innenfor akseptabel trykkgrense. Tabeller for $N1 = 1,0$ og $N1 = 1,5$ ligger som vedlegg.

Tabell 5: Trykkverdier [mVS] for utvalgte tidspunkter

	Hele sonen		Kritisk punkt		Lengst unna	
Tidspunkt	04	07	04	07	04	07
90-TRV	76.1	74.2	51.7	49.4	83.0	80.3
65-TRV	51.4	49.7	26.9	24.9	58.0	55.6
Bermad	37.0	45.1	12.4	20.4	43.7	51.1

4.2.4 Trykkprofil over et døgn

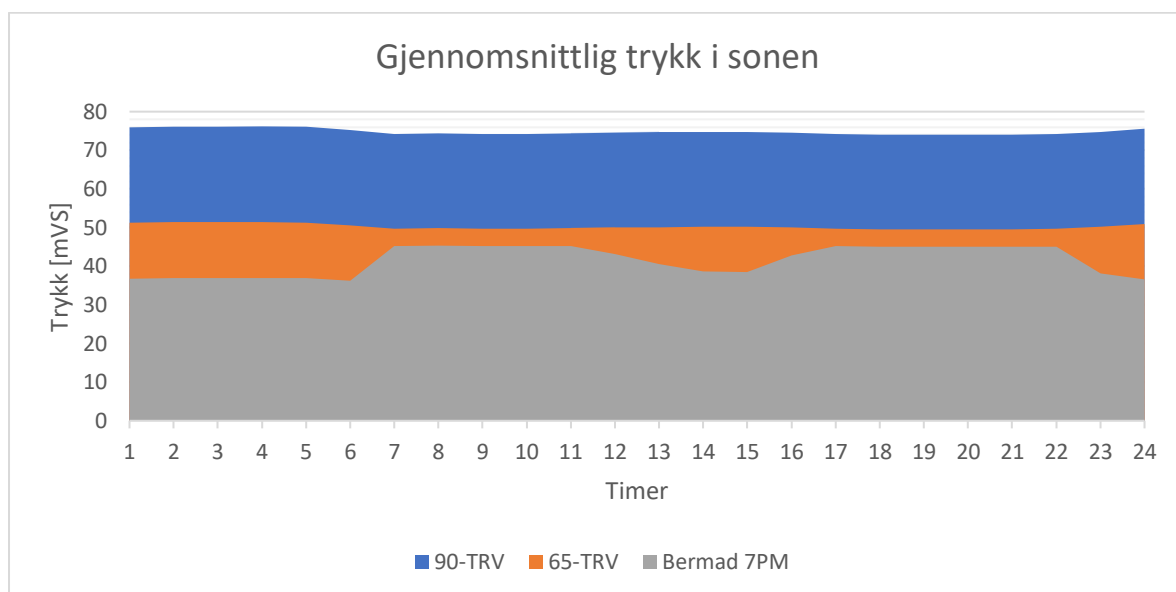
Tidligere i analysen har det blitt undersøkt hvordan trykksituasjonen er for spesifikk tidspunkter. For denne analysen vil gjennomsnittstrykket bli grafisk presentert for sonen. Hjelpernodes i pumpestasjonen og ved ventil er ikke tatt med i beregningen. Det er ikke gjort gjennomsnittsberegning av trykk i KP siden det gjelder for den enkelte node. Trykkverdiene er fremstilt over et døgn.

Gjennomsnittlig trykk i sonen over et døgn

Det gjennomsnittlige trykket i sonen er beregnet for hver time over et døgn.

Gjennomsnittstrykket for 90-TRV er beregnet å være 75 mVS etterfulgt av 65-TRV på 50 mVS. Høy gjennomsnittstrykk skyldes trolig trykk i hovedledningene og i lavtliggende node.

Figur 41 viser at gjennomsnittstrykket er tilnærmet konstant for konvensjonelle TRV'er for sonen over døgnet. Bermad responderer på trykkfall i sonen og slik at gjennomsnittstrykket er mellom 36-45 mVS med snitt på 41 mVS.

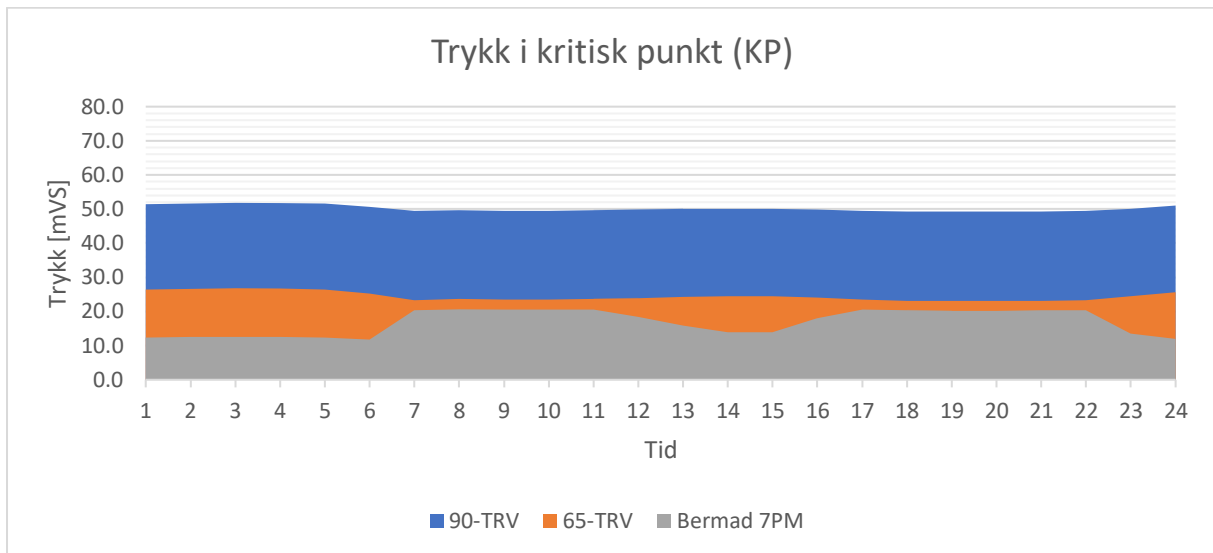


Figur 41: Gjennomsnittlig trykk i sonen for hver time over et døgn

Trykk i KP over et døgn

Konvensjonelle TRV'er sørger for stabilt og akseptabelt trykknivå. Med 65-TRV er fortsatt minstekravet på 20 mVS innfridd. Den eksisterende ventilen, 90-TRV, har

reduksjonspotensialet på 25-30 mVS i nedstrøms trykk uten at det går utover leveringstrykket i KP. Bermad fremstår som driftssikker og besparer trykket i perioder med lavt forbruk godt. Dette til tross for at ventilen leverer varierende trykk sammenlignet med opprinnelig TRV over et døgn.



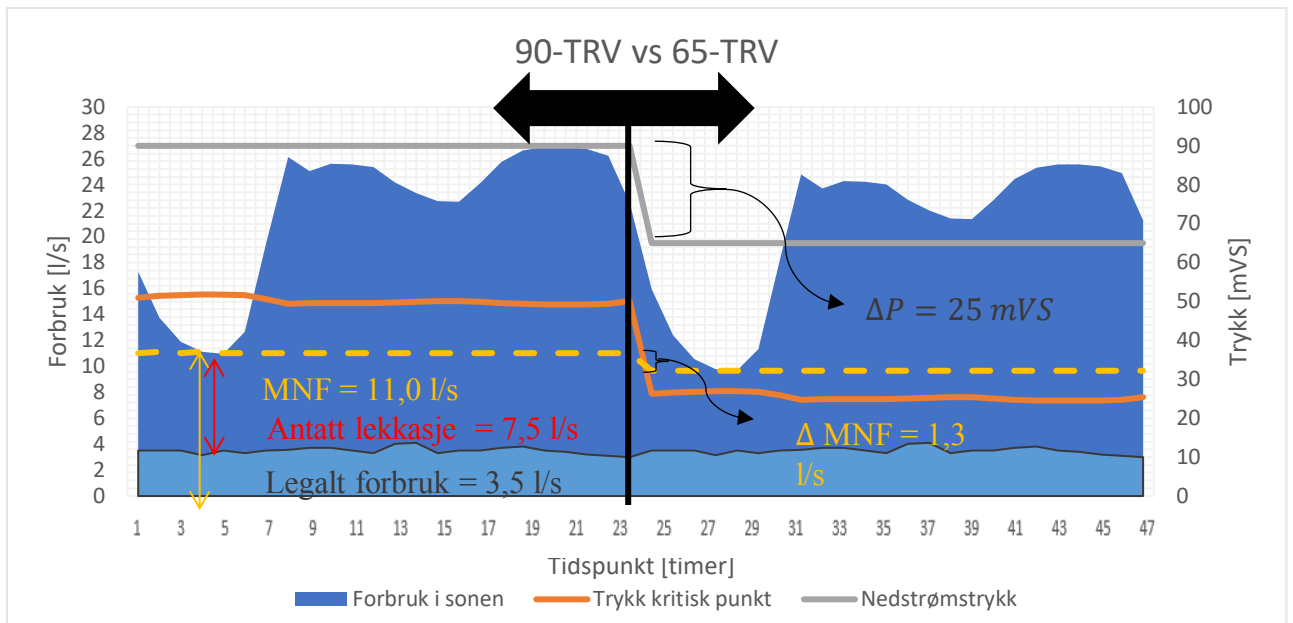
Figur 42: Trykk i kritisk punkt (KP) for hver time over et døgn

4.2.5 Reduksjonspotensialet i lekkasje ved MNF

I denne delen av analysen blir vår referansemodell sammenstilt med 65-TRV og Bermad i samme graf. Hensikten er å vise effekten av trykkstyring og observere effekten det har på minste nattforbruk. Trykkprofilen for KP og nedstrøms trykk for ventilen er presentert i samme graf. Analysen er presentert for $N1 = 0.5$.

Forskjell i MNF og trykk mellom opprinnelig ventil og 65-TRV ved $N1 = 0,5$

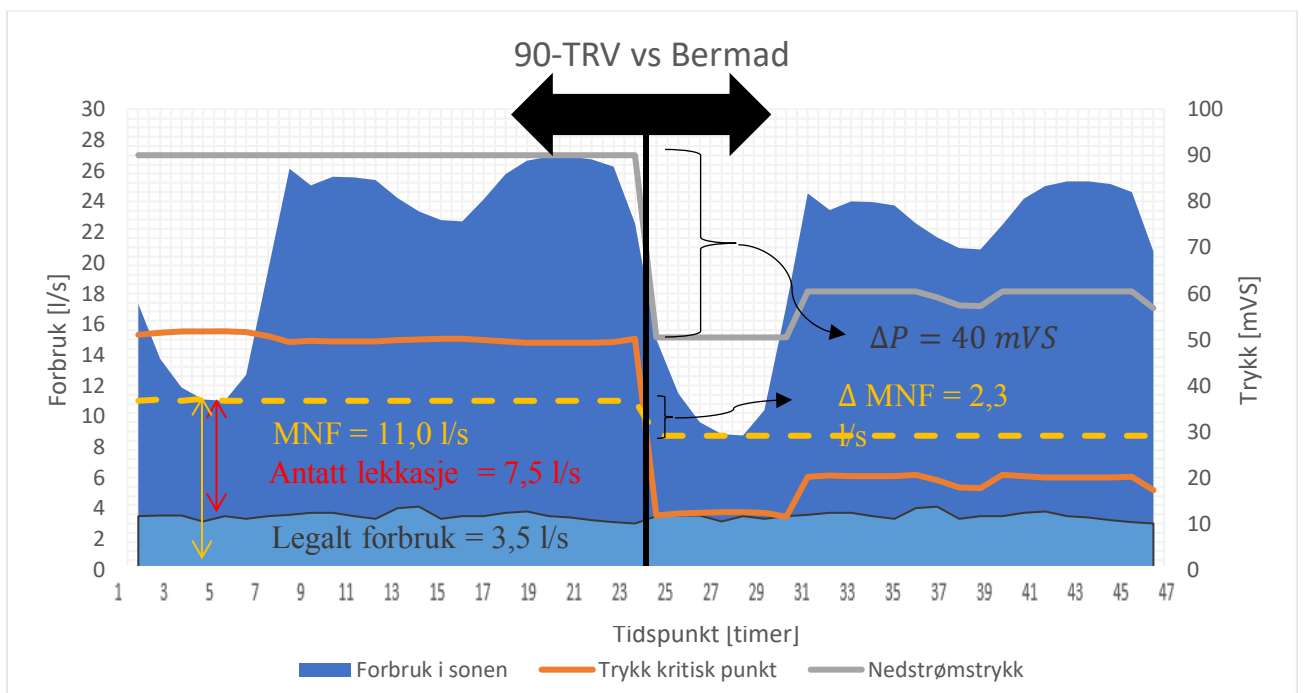
Med 65-TRV vil sonen oppleve en reduksjon i minste nattforbruk på 1,3 l/s. Dette er en konsekvens av trykknedsenking på 25 mVS. Trykk i KP er fortsatt over 20 mVS.



Figur 43: 90-TRV vs. 65-TRV ved normalsituasjon og $NI = 0,5$

Forskjell i MNF og trykk mellom opprinnelig ventil og Bermad ved $NI = 0,5$

Med en mengderegulert ventil vil sonens minste nattforbruk kunne senke med 2,3 l/s samtidig ha tilstrekkelig driftstrykk. Figur 44 viser at nedstrøms trykk med Bermad ligger på 50-60 mVS avhengig av forbruk. Det betyr at trykket i sonen er redusert med 30-40 mVS.



Figur 44: 90TRV vs. 65-TRV ved normalsituasjon og $NI = 0,5$

4.2.6 Totalforbruk og lekkasjeandel

I forrige avsnitt så vi på sammenheng mellom minste nattforbruk med trykkendring. I denne analysen er det aktuelt å se sammenhengen mellom totalforbruket og lekkasje. Lekkasjenivået for ventilene er presentert grafisk ved $N1 = 1.0$ og $N = 1.5$ sammen med legalt forbruk. Arealet under grafen representerer totalvolumet av lekkasje/forbruk over et døgn. Til sammenligning er forventet vanntap ved 90-TRV 7,5 l/s.

Generelt funn fra grafene:

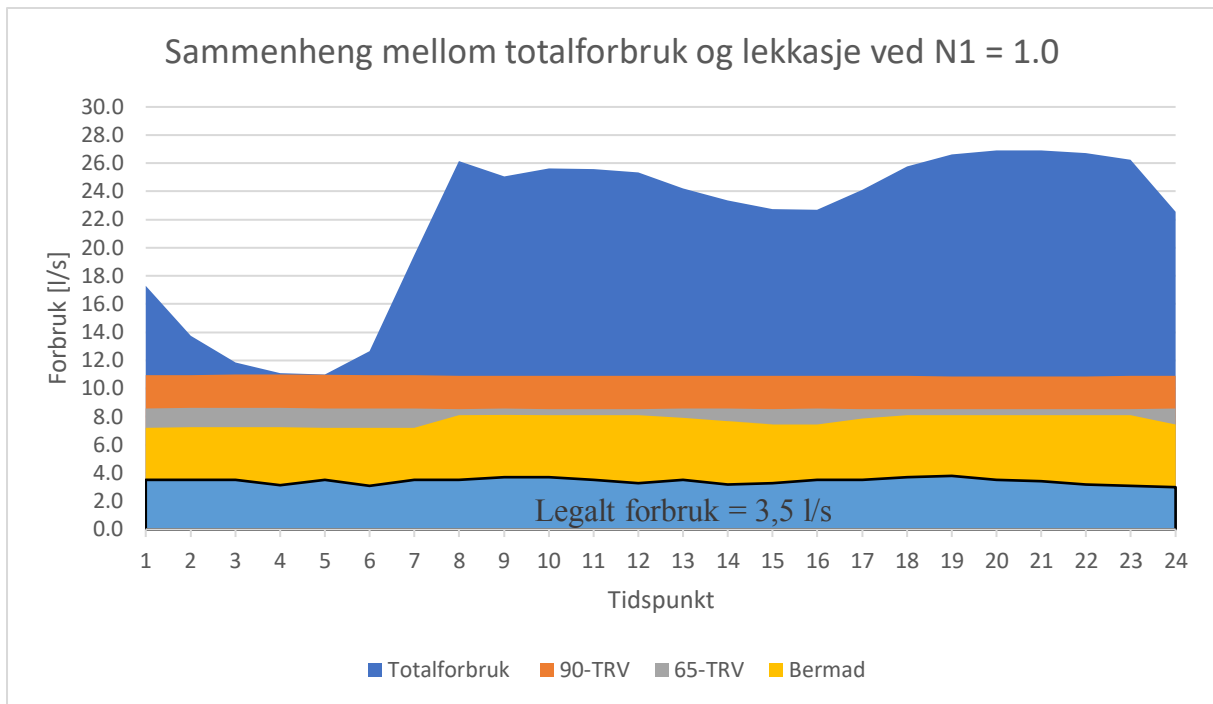
Lekkasjenivået med 65-TRV er stabilt utover døgnet men er noe høyere ved nattetid. Lite variasjon i lekkasjenivå kan tyde på at nettet har god kapasitet og at trykktapet ikke er stor nok til å utgjøre en vesentlig forskjell. Følgelig betyr det at trykket varierer i mindre grad med vannføringen.

Lekkasjenivået med Bermad er lavt i perioder med lavt forbruk. Da trykket i sonen er senket vil det være mindre tilgjengelig trykk som driver lekkasjenivået.

Sammenheng mellom totalforbruk og lekkasjenivå ved $N1 = 1.0$

Lekkasjenivået for 65-TRV holder seg stabilt rundt 5,1 l/s (fratrasket legalt forbruk) men har marginal økning i nattetid.

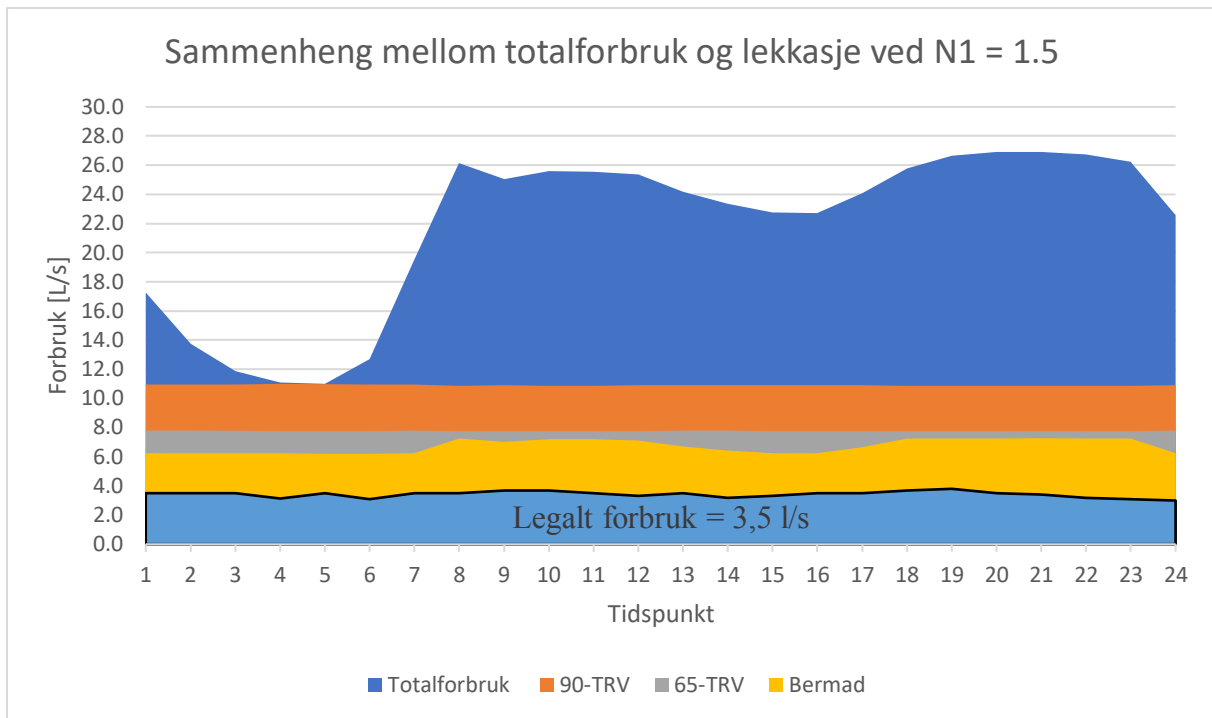
Lekkasjenivået for Bermad varierer mellom 3,7-4,6 l/s da tilgjengelig trykk varierer med forbruksmønsteret i sonen.



Figur 45: Sammenheng mellom totalforbruk og lekkasje ved $N1 = 1.0$

Sammenheng mellom totalforbruk og lekkasje ved $N1 = 1.5$

Økt lekkasjeeksponent påvirker lekkasjenivået for Bermad i større grad enn 65-TRV. Med konvensjonell ventil er lekkasjenivået tilnærmet 4,3 l/s. Bermad har 2,7-3,8 l/s.



Figur 46: Sammenheng mellom totalforbruk lekkasje ved N1 = 1.5

4.2.7 Lekkasjeutvikling over et døgn

I denne delen vil det først gjøre rede for hvordan totalbruket i sonen er blitt redusert med ulike ventiler og N1-verdier. Til slutt vil lekkasjen for hver ventil sammenstilles i en tabell.

Redusert totalforbruk i sonen

Tabell 6 viser reduksjon i totalforbruket for 65-TRV og Bermad sammenlignet med nåværende ventil med respektive N1-verdier. Redusert totalforbruk er oppgitt i prosent uten desimaler for å være mer oversiktlig. Det er særlig to observasjoner som er nyttig:

Effekten av N1:

Redusert totalforbruk i prosent øker med stigende N1-verdi for ventilene. Det er spesielt Bermad som har høyt reduksjonspotensial da ventilen er trykkavhengig.

Reduksjon utover dagen:

Største reduksjonen i totalforbruket foregår i tidsperioder med lavest forbruk. I nattestid er nytteforbruket lavest. Med 65-TRV er nedstrøms trykk konstant slik at lekkasjeandelen holder seg stabilt uavhengig av nytteforbruket. Dermed vil lekkasjeandelen holde seg jevnt utover

dagen mens nytteforbruket øker. Besparelspotensialet avtar som følge av dette. Bermad viser tendenser til størst reduksjonspotensial på nattestid som antatt. Besparelsen avtar når forbruket øker utover døgnet.

Tabell 6: Redusert totalforbruk (%) for gitt tidsperioder i døgnet og angitte N1-verdier

N1-verdi	Ventil	Tidsintervaller på dagen					
		00-03	04-07	08-11	12-15	16-19	20-23
0.5	65-TRV	10 %	9 %	5 %	6 %	5 %	5 %
	Bermad	17 %	14 %	6 %	7 %	6 %	7 %
1.0	65-TRV	18 %	15 %	9 %	10 %	9 %	9 %
	Bermad	28 %	23 %	11 %	14 %	11 %	11 %
1.5	65-TRV	24 %	22 %	12 %	13 %	12 %	12 %
	Bermad	36 %	32 %	15 %	19 %	15 %	15 %

Samlet lekkasjeandel for gitte N1-verdier og ventiler

Lekkasjevannføringen er oppgitt i Tabell 7 over hvert tidspunkt for sine respektive ventiler og med forskjellige N1-verdier. Samlet lekkasjeberegning er oppgitt i liter per døgn [l/d] og kubikkmeter vann per år [m³/år]. Besparelse i lekkasjeandel er beregnet i prosent med opprinnelig lekkasjenivå som referanseverdi.

Med 65-TRV vil lekkasjeandelen minst kunne redusere med 18,0 % og maksimalt 42,4 % avhengig av ledningsnettets egenskaper og omkringliggende faktorer.

Bermad har et besparelspotensial på minimum 24,9 %. Maksbesparelse på 56,4 % virker i overkant mye med tanke på rørsammensetningen i sonen.

Tabell 7: Lekkasjeberegning [l/s] for ventiler med tilhørende N1-verdi

Tidspunkt	Lekkasje ref.		65-TRV			Bermad		
	90-TRV	N1 = 0.5	N1 = 1.0	N1 = 1.5	N1 = 0.5	N1 = 1.0	N1 = 1.5	
1	7.4	6.1	5.1	4.3	5.2	3.7	2.7	
2	7.5	6.1	5.1	4.3	5.2	3.8	2.7	
3	7.5	6.1	5.1	4.3	5.2	3.8	2.7	
4	7.5	6.2	5.1	4.3	5.2	3.7	2.7	
5	7.5	6.2	5.1	4.3	5.2	3.7	2.7	
6	7.5	6.1	5.1	4.3	5.2	3.7	2.7	
7	7.4	6.1	5.1	4.3	5.2	3.7	2.7	
8	7.4	6.0	5.0	4.3	5.8	4.6	3.8	
9	7.4	6.1	5.1	4.3	5.8	4.6	3.5	
10	7.4	6.0	5.1	4.3	5.8	4.6	3.7	
11	7.4	6.0	5.0	4.3	5.8	4.6	3.7	
12	7.4	6.0	5.0	4.3	5.8	4.6	3.6	
13	7.4	6.1	5.1	4.3	5.8	4.4	3.2	
14	7.4	6.1	5.1	4.3	5.7	4.2	2.9	
15	7.4	6.1	5.1	4.3	5.6	3.9	2.7	
16	7.4	6.1	5.1	4.3	5.6	3.9	2.7	
17	7.4	6.1	5.1	4.3	5.8	4.4	3.2	
18	7.4	6.0	5.0	4.3	5.8	4.6	3.7	
19	7.4	6.0	5.0	4.3	5.8	4.6	3.8	
20	7.4	6.0	5.0	4.3	5.7	4.6	3.8	
21	7.4	6.0	5.1	4.3	5.8	4.6	3.8	
22	7.4	6.0	5.0	4.3	5.7	4.6	3.8	
23	7.4	6.0	5.0	4.3	5.8	4.6	3.8	
24	7.4	6.1	5.1	4.3	5.6	3.9	2.8	
Beregning								
l/d	640 507.3	525 001.0	437 966.3	369 085.0	481 321.8	366 040.4	279 164.5	
m ³ /år	233 785.2	191 625.4	159 857.7	134 716.0	175 682.5	133 604.8	101 895.0	
Besparelse %		18.0 %	31.6 %	42.4 %	24.9 %	42.9 %	56.4 %	

Diskusjon og oppsummering av tilstandsanalyse

I denne delen vil det bli oppsummert og drøfte noen deler fra analysen som er utført ved gitt normal driftssituasjon uten brannvanntapp.

Vurdering av overskuddstrykket i sonen og reduksjonspotensial

Med dagens situasjon har ikke ventilen noen problemer med å selvforsyne sonen. Det har sine ulemper da nedstrøms trykket anses som unødvendig høyt. Observert overskuddstrykk i deler av sonen er over akseptabelt nivå og har et gjennomsnittstrykk over 74 mVS (Tabell 5).

Trykknivået i sonen betraktes som konstant da det er lite variasjonen i verdier uavhengig av tidspunkt og forbruksmønstre. Lekkasje-nivået er stabilt og gir tendens av at ledningsnettets har god kapasitet. Trykknivået i kritisk punkt er 50 mVS og er innenfor akseptabelt driftstrykk.

Det er en vurdering på hvor mye trykksenkning vi kan tillatte i dette punktet og gevinsten det vil ha for lekkasjeomfanget. Det foreligger et reduksjonspotensial på 30 mVS i KP avhengig av brannvanntapp. Basert på funnene i resultatet vil 270-sonen ha nytte av trykkreduksjon.

Det er viktig å understreke at trykkreduksjon vil bidra positivt i kampen om vanntapsproblematikken for denne sonen.

Vurdering av robusthet og driftssikker vannleveranse med 65-TRV og Bermad

En alternativ løsning er permanentstyring. I dette caset har vi foreslått å senke nedstrøms trykk i eksisterende ventil til 65 mVS, derav navnet 65-TRV. Med en lavere men fast nedstrøms trykk vil ledningsnettets være mindre belastet og oppleve generelt lavere trykknivå i sonen. Kritisk punkt i sonen vil fortsatt ha et tappetrykk minst 25 mVS i perioder med høyt forbruk. Vi må allikevel akseptere et driftstrykk på 50 mVS ved nattetid i sonen for å opprettholde minstetrykket i kritisk punkt. Lekkasjevannføring i forbindelse med nattes trykket er ikke mulig å bespare. Videre er det ikke anbefalt å ha et nedstrøms trykk under 65 mVS som er den mest optimistiske innstillingen. Et nedstrøms trykk mellom 65-90 mVS kan være en ideell løsning avhengig av hvilken grad kommunen vektlegger robusthet opp mot besparelspotensial i lekkasje.

Mengdestyrt trykkreduksjonsventil, Bermad 7PM, fremstår som en habil og driftssikker løsning. Ventilen er robust i den forstand at den reagerer simultant med forbruksvariasjonen i

sonen. Ventilen leverer trykk innenfor gitt driftsområde som er på 50-60 mVS nedstrøms. Dette fører til at sonen har et gjennomsnittstrykk på 35-45 mVS. Sammenlignet med konvensjonelle TRV'er vil ikke Bermad levere mer trykk enn det sonen behøver. Ventilen er i en særstilling til å redusere overskuddstrykket i nattestid. Observert nattes trykk er på 12 mVS som tilsvarer 75% reduksjon fra opprinnelig ventil.

I dette caset tilfredsstiller vår foreslåtte ventilkurve minstetrykket i kritisk punkt på 20 mVS ved maksforbruk. Dersom kommunen ønsker å levere et høyere «service-trykk», vil det konsekvens føre til overflødig trykk i nettet som kunne ha blitt bespart. Når det er sagt, bør fokusere være å redusere trykk i nattestid da det har størst besparelespotensialet.

Bermad 7PM klarer egenhendig å selvforsyne sonen med driftsvennlig trykk og det vil ikke være behov for annet vannforsyning.

Vurdering av reduksjonspotensial i lekkasje med varierende N1-verdi

Gjennom resultatdelen har det blitt gjort observasjoner med varierte lekkasjeeksponentverdier for å forstå lekkasje-trykkforholdet i vår sone. N1-verdi har særlig betydning i lekkasjeandel for Bermad kontra tradisjonelle trykkreduksjonsventiler. Dette er ikke overraskende da Bermad reagerer på trykkendring. Bespart lekkasjeandel har en tendens til å være høyere desto følsom distribusjonsnettet er ovenfor trykk uttrykt med N1-verdi. I vårt tilfelle hadde det vært tilstrekkelig med N1-verdi mellom 0,5-1.0 da 82 % av nettet består av rigid materiale. Lekkasjeberegningene ved $N1 = 1,5$ med 56,4 % reduksjonspotensialet virker ikke reelt. Disse beregningene bør brukes med omhu og vurderes som ytterpunktene i økonomisk analyse senere i kapitlet. For 65-TRV vil besparelsesrammen ligge 18,0-42,4 % og Bermad på 24,9-56,4 %.

Vurdering av begrensninger og svakhet med modellen

Det er viktig å bemerke seg at lekkasje er blitt modellert som funksjon av nodetrykket. I den virkelige verden vil lekkasje forekomme i anboringer, på ledningen og utlekk i sonegrensene. Disse faktorene har blitt inkorporert i lekkasjekonstanten og lekkasjeeksponenten. Det er derfor rom for feildata. Modellen har i tillegg ikke inkludert lekkasje ved brudd. Det har dermed ikke sett på effekten av trykkreduksjon på bruddfrekvenser. Dette er en viktig feilkilde vi har valgt å ikke fokusere da.

I modellen er en forutsetning om atmosfærisk trykk ved bruk av emitter-funksjonen. Fra teorien vil lekkasjeomfanget være i mer eller mindre grad påvirket av jordhydraulikk.

Modellen har ikke tatt stilling til FAVAD-konseptet om merlekkasje forbundet med utvidet arealtverrsnitt i rør.

4.3 Funksjonsanalyse

I funksjonsanalysen vil sonen bli utsatt for en rekke branntilfeller med hensikt om å observere hvordan distribusjonsnettets reagerer ved ulike ventiler. Ventilene som blir testet er de samme fra tilstandsanalysen.

I forkant av videre funksjonsanalyse ble det gjort en stikkanalyse ved brann i kritisk punkt for å avdekke om det er signifikant forskjell i brannvannkapasitet ved bruk av forskjellige N1-verdier. Det er behov å utrede funksjonsanalyse for den N1-verdien som gir mest konservativ brannvannkapasitet. Begrunnelsen er at det er tidskonsumerende og ikke høyest nødvendig å analysere alle modellene parallelt.

4.3.1 Stikkanalyse – Avvik i brannvannkapasitet mellom N1-verdier

Ut ifra tabellen er det ikke store variasjoner i resttrykk ved varierende N1-verdier.

Tabell 8 viser resttrykkverdiene ved installert brannvantapp på 20 l/s i KP. Branntilfellet foregår på ettermiddagstid. Tabellen viser resttrykk utvikler seg i løpet av en sammenhengende brann på fire timer. Resttrykkverdier er oppgitt i intervaller for å vise ytterpunktene ved $N1 = 0,5$ og $N1 = 1,5$. Ut ifra tabellen er det ikke store variasjoner i resttrykk ved varierende N1-verdier.

Tabell 8: Trykk[mVS] i KP ved brannuttak på 20 l/s.

Tidspunkt	14-15	15-16	16-17	17-18
90-TRV	[42,3 – 42,9]	[42,2 – 42,4]	[41,5 – 41,7]	[41,2 – 41,4]
65-TRV	[18,2– 18,9]	[17,7 – 18,5]	[17,1 – 17,8]	[16,8 – 17,6]
Bermad	[13,6 – 14,4]	[13,1 – 13,9]	[12,6 – 13,3]	[12,1– 13,1]

Her sjekker vi hvordan brannvannkapasiteten er i mengde ved gitt resttrykk på 10 mVS. viser

Tabell 9 viser kun minst resttrykkverdi under brann på nattes- og ettermiddagstid.

Fra

Tabell 9 er brannvannkapasiteten tilnærmet konstant uavhengig av N1-verdi. Det er kun 0,5-1,0 l/s i forskjell mellom N1=0,5 og N1=1,5. Dette funnet er sammenfallene med Ut ifra tabellen er det ikke store variasjoner i resttrykk ved varierende N1-verdier.

Tabell 8.

Tabell 9: Minste brannvannkapasitet [l/s] gitt resttrykk 10 mVS i KP

	Natt			Ettermiddag		
N1-verdi	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
90-TRV	62.9	63.5	64	55.6	56.3	56.5
65-TRV	38.1	38.9	39.5	30.5	31.4	32
Bermad	31.6	32.4	33	23.5	24.5	24.9

Videre i funksjonsanalysen skal modellen med N1 = 0,5 bli benyttet på bakgrunn av at den gir lavest resttrykkverdi.

4.3.2 FASE 1 – Ensidig vannforsyning med brannuttak

I fase 1 vil individuelle branntilfeller foregå på de foreslåtte stedene i metoden. Reservoaret, VP10, blir ikke benyttet. I denne analysen vil branntilfelle foregå på natt og ettermiddag.

Branntilfelle 1: Kritisk punkt med brannuttak på 20 l/s

Resttrykk er noe lavere i de utfordrende områdene med høyt kotehøyde.

Figur 47: Noder (markert rødt) med resttrykk mellom 10-20 mVS ved nattestid (t.v) og ettermiddag (t.h) for Bermad

beskriver trykknivået i noder som opplever trykknivå under 20 mVS som følge av brann i KP. Noen verdier er utelatt da de ikke er relevant for analysen.

Kritisk punkt (markert rødt):

Vi observerer at resttrykk for samtlige ventiler overholder krav på minst 10 mVS gjennom fire timer uavhengig av når brannen inntreffer på dagen. Det gir en indikasjon på at systemet takler brannvanntapp på 20 l/s. Bermad klarer på lik linje som konvensjonelle TRV å oppfylle kravet til tross for lavere driftstrykk. 90-TRV har god kapasitet og ingen noder har under 20 mVS resttrykk.

Andre kommentarer:

- Ingen noder opplever lavere trykk enn 10 mVS for samtlige ventiler.
- Brann i KP gir utslag i trykk for omkringliggende noder.

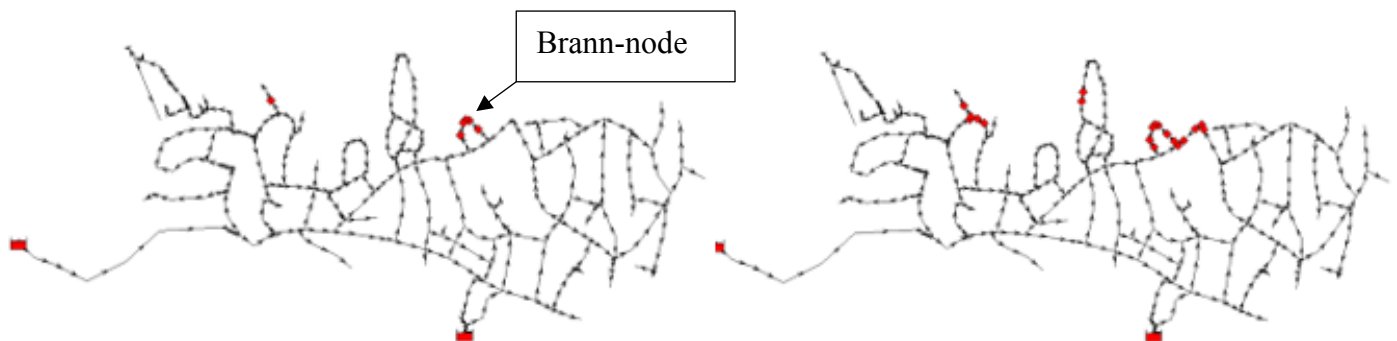
Tabell 10: Noder med resttrykk under 20 mVS ved brann. X > 46 mVS og Z > 20 mVS

Høyde [m]	Node	Natt			Ettermiddag		
		90-TRV	65-TRV	Bermad	90-TRV	65-TRV	Bermad
212.6	241611	x	z	z	x	z	17.8
212.3	241613	x	z	z	x	z	18.2
211.9	241615	x	z	z	x	z	18.5
211.4	241700	x	z	z	x	z	19.0
210.5	241701	x	z	z	x	z	19.9
214.6	241705	x	z	19.6	44.4	20.0	15.3
216.9	241707	46.0	z	16.8	41.6	17.2	12.5
217.2	241708	45.6	z	16.4	41.2	16.8	12.1
217.2	241710	45.7	z	16.5	41.3	16.9	12.2
215.7	241712	x	z	18.4	43.2	18.7	14.1

213.1	241714	x	z	z	x	z	17.0
211.8	241715	x	z	z	x	z	18.5
213.3	242715	x	z	z	x	z	19.1
217.7	243208	x	z	z	x	z	17.3
212.5	243211	x	z	z	x	z	19.9
216.9	255643	x	z	z	x	z	18.2
215.8	255645	x	z	z	x	z	19.3
216.4	255678	x	z	z	x	z	18.7
217.2	271024	x	z	z	x	z	17.9

(Rød = kritisk punkt, oransje = noder nær kritisk punkt)

Resttrykk er noe lavere i de utfordrende områdene med høyt kotehøyde.



Figur 47: Noder (markert rødt) med resttrykk mellom 10-20 mVS ved nattestid (t.v) og ettermiddag (t.h) for Bermad

Branntilfelle 2: Småhusbebyggelse med brannuttak på 20 l/s

Tabell 11 framstiller kun noder med resttrykk under 16 mVS som følge av brann i småhusbebyggelse.

Brann-noden (markert grønn):

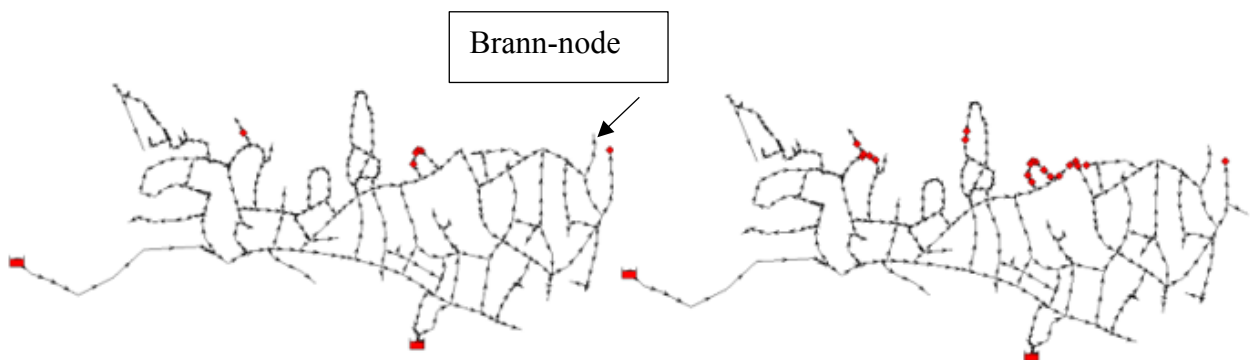
- Med 90-TRV er resttrykket i de utfordrende nodene 30-38 mVS over minstekrav avhengig av når brannen inntreffer.
- 65-TRV og Bermad tilfredsstiller kravet men i mindre grad. Det stilles spørsmål om en margin på 1-6 mVS over resttrykk er godt nok ved brann på ettermiddagstid.

Tabell 11: Noder med resttrykk under 15 mVS ved brann

Høyde [m]	Node	Natt			Ettermiddag		
		90-TRV	65-TRV	Bermad	90-TRV	65-TRV	Bermad
216.9	241707	47.2	22.7	18.1	43.0	18.6	13.9
217.2	241708	47.0	22.3	17.8	42.7	18.3	13.6
217.2	241710	47.0	22.4	17.8	42.7	18.3	13.6
215.7	241712	48.5	23.9	19.4	44.2	19.8	15.2
185.9	243828	47.1	22.7	18.2	40.4	16.2	11.6

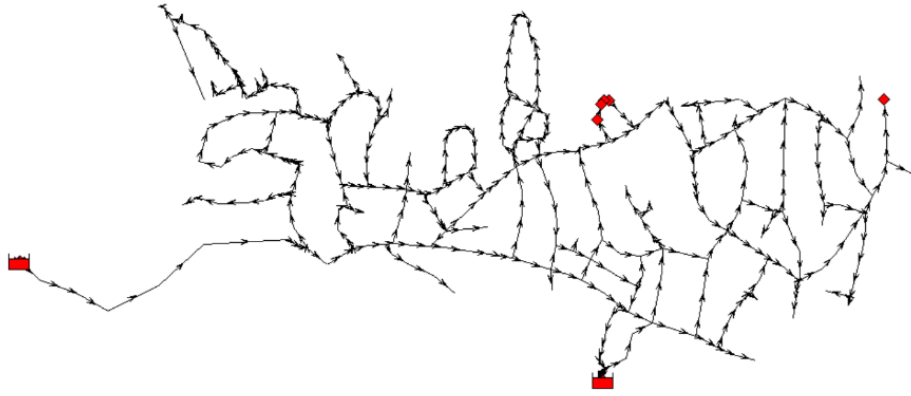
(Grønn = Brann-node, rød = kritisk punkt)

Ved brann i småhusbebyggelse vil resttrykkverdiene være noe lavere i de utfordrende områdene ved bruk av Bermad.



Figur 48: Noder (markert rødt) med resttrykk mellom 10-20 mVS ved nattestid (t.v) og ettermiddag (t.h) for Bermad

Med 65-TRV vil mange noder fortsatt ha resttrykk over 20 mVS utenom området ved KP og i brann-noden.



Figur 49: Noder (markert rødt) med resttrykk mellom 10-20 mVS på ettermiddag for 65-TRV

Branntilfelle 3: Leilighetsområdet med brannuttak på 50 l/s

Tabell 12 beskriver trykknivået i noder som opplever trykknivå under 11 mVS som følge av brann i leilighetsområde.

Brann å nattetid:

- 90-TRV og 60-TRV har ikke problemer med å opprettholde resttrykket. Det gjør heller ikke Bermad men det er observert lave resttrykkverdier for utfordrende noder i sonen.

Brann i ettermiddagstid:

- Bermads resttrykkverdi er kritisk nær minstekravet.
- 90-TRV holder fremdeles høyt resttrykk med margin over 30 mVS. 65-TRV har margin på 5-6 mVS.

Tabell 12: Noder med resttrykk under 11 mVS og brann-node ved brann

		Natt			Ettermiddag		
Høyde [m]	Node	90-TRV	65-TRV	Bermad	90-TRV	65-TRV	Bermad
216.9	241707	45.3	20.7	12.5	40.2	16.0	11.0
217.2	241708	45.0	20.4	12.2	39.9	15.7	10.7
217.2	241710	45.5	20.4	12.2	39.9	15.7	10.7
217.7	243208	44.2	19.7	11.9	39.8	15.5	10.5
216.9	255643	51.3	20.5	12.7	40.6	16.3	11.3
216.4	255678	45.2	20.1	16.2	41.1	16.8	11.8
217.2	271024	44.8	20.3	15.4	40.4	16.5	11.1
178.4	247156	90.6	65.7	49.3	74.1	49.7	44.7

(Gul = Brann-node, rød = Kritisk punkt)

Med Bermad har sonen bedre brannvannkapasitet ved nattestid kontra ettermiddag. Det er særlig de utfordrende områdene som får lavere resttrykk.



Figur 50: Noder (markert rødt) med resttrykk mellom 10-20 mVS ved nattestid (t.v) og ettermiddag (t.h) for Bermad

Brannvannkapasiteten er god uavhengig av tidspunkt. Minste resttrykk er observert for 15 mVS på ettermiddagstid som er tilstrekkelig.



Figur 51: Noder (markert rødt) med resttrykk mellom 10-20 mVS ved nattestid (t.v) og ettermiddag (t.h) for 65-TRV

4.3.3 FASE 2 – Ensidig vannforsyning med brannuttak og stengte ledninger

I fase 1 blir brannanalysert utført for gitte scenarioer forklart i metoden. Hensikten er å kartlegge hvor i sonen resttrykket er under 10 mVS for brann på ettermiddagstid med stengte ledninger.

Branntilfelle 1: Kritisk punkt med brannuttak på 20 l/s og scenario 1

Tabell 13 viser at 90-TRV ikke har noen problemer med å opprettholde godt resttryknivå i sonen. Det er ingen noder som har mindre resttrykk enn 31 mVS.

65-TRV og Bermad har vansker med å fordele tilgjengelig trykk i sonen. Resttrykk er lavere enn akseptabelt nivå.

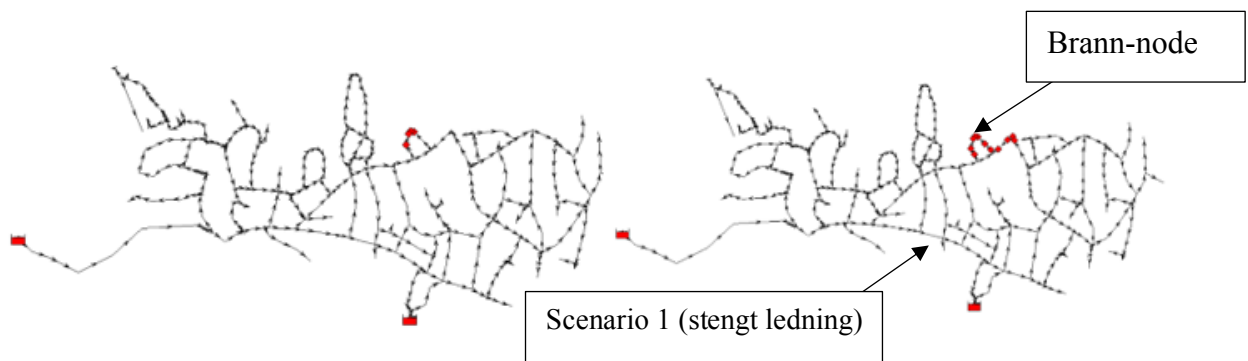
Tabell 13: Noder med resttrykk under 10 mVS ved brann i KP med stengt ledning (scenario 1). 32 mVS og $Z > 10$ mVS

Høyde [m]	Node	90-TRV	65-TRV	Bermad
212.6	241611	x	z	8.5

212.3	241613	x	z	8.8
211.9	241615	x	z	9.2
211.4	241700	x	z	9.7
214.6	241705	x	z	6.0
216.9	241707	31.5	7.7	3.3
217.2	241708	31.1	7.4	2.9
217.2	241710	31.1	7.5	3.0
215.7	241712	33.1	9.3	4.9
213.1	241714	x	z	7.8
211.8	241715	x	z	9.2

(Rød = Kritisk punkt)

Figur 52 viser hvilke at området rundt KP blir opplever lavere resttrykk som følge scenarioet.



Figur 52: Noder (markert rødt) med resttrykk under 10 mVS ved brann i kritisk punkt med stengt ledning på ettermiddagstid. 65-TRV (t.v), Bermad (t.h)

Branntilfelle 2: Småhusbebyggelse med brannuttak på 20 l/s og scenario 1

Tabell 14 viser at 90-TRV fortsatt leverer godt med trykk til tross for brann og stengt ledning.

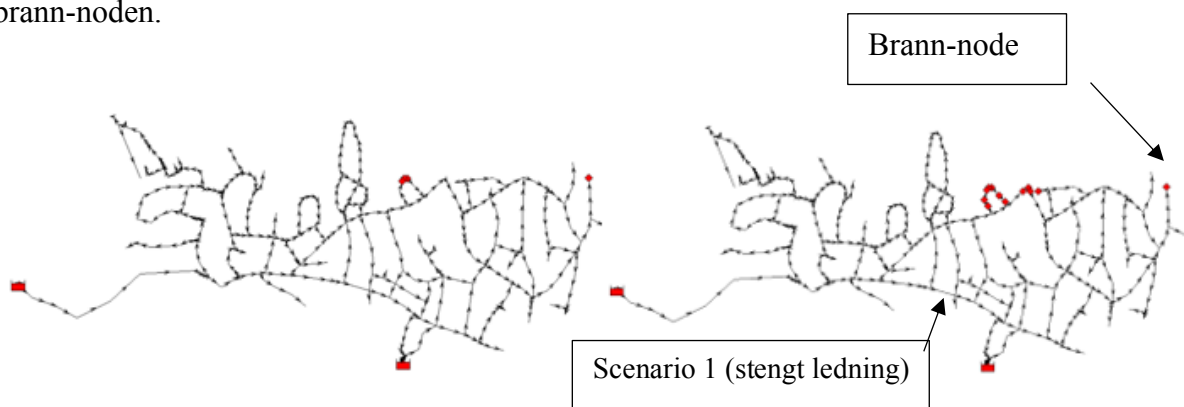
Det er Bermad og 65-TRV som ikke klarer å opprettholde trykknivået over 10 mVS.

Tabell 14: Noder med resttrykk under 10 mVS ved brann i småhusbebyggelse med stengt ledning (scenario 1). $X > 35$ og $Z > 10$.

Høyde [m]	Node	90-TRV	65-TRV	Bermad
212.6	241611	x	z	8.7
212.3	241613	x	z	8.9
211.9	241615	x	z	9.1
209.6	241620	x	z	9.5
214.6	241705	x	z	7.0
216.9	241707	33.0	9.2	4.7
217.2	241708	32.7	8.9	4.4
217.2	241710	32.7	8.9	4.4
215.7	241712	x	z	6.0
213.1	241714	x	z	8.7
211.8	241715	x	z	9.8
185.9	243828	29.8	6.3	1.9

(Rød = Kritisk punkt, Grønn = brann-node)

Figur 53 viser at nodene i nærheten av KP blir berørt av påkjennelsen i systemet i tillegg til brann-noden.

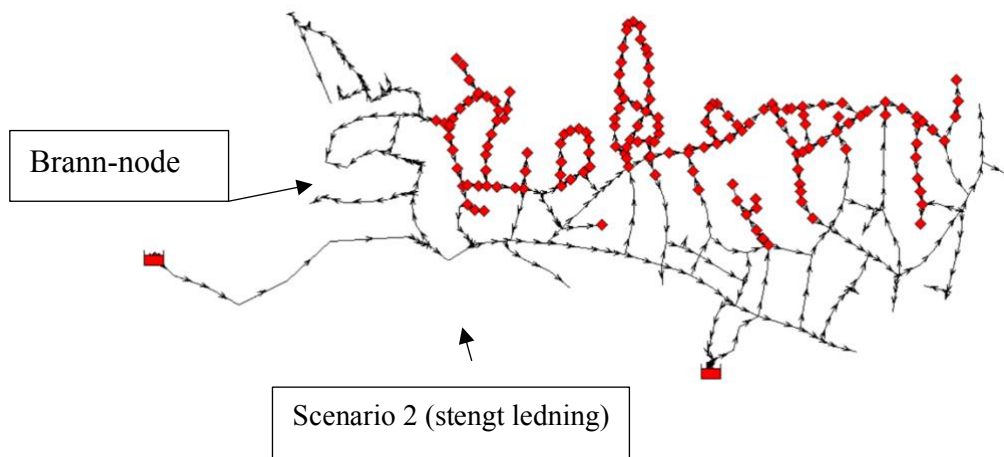


Figur 53: Noder (markert rødt) med resttrykk under 10 mVS ved brann i småhusbebyggelse med stengt ledning på ettermiddagstid. 65-TRV (t.v), Bermad (t.h)

Branntilfelle 3: Leilighetsområdet med brannuttak på 50 l/s og scenario 2

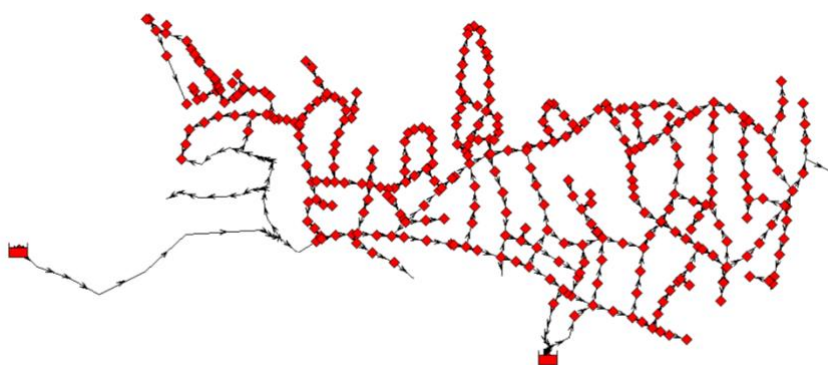
Denne analysen er blitt gjort for å vise hvordan systemet vil takle under et unntakstilfelle med kun én vannforsyning. Denne analysen er forløperen til fase 3 der vi undersøker om tosidig vannforsyning kan overvinne denne brannsituasjonen.

Figur 54 viser branntilfellet med stengt ledning (scenario 2) ved 90-TRV. Det gir indikasjon på at dette scenarioet er et ekstremt tilfelle.



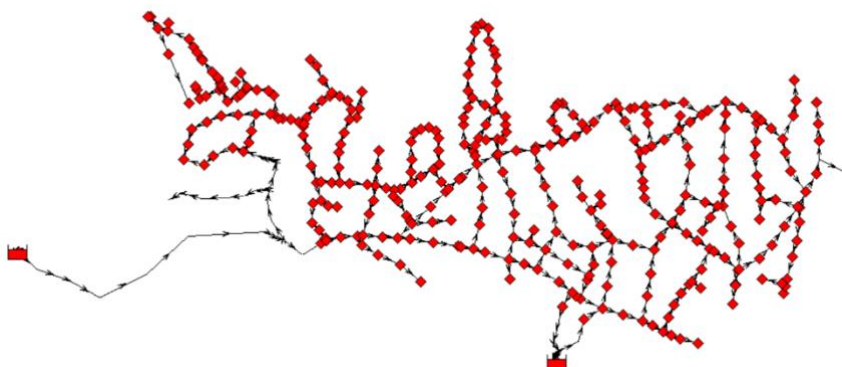
Figur 54: Noder (markert rødt) med resttrykk under 10 mVS ved bruk av 90-TRV

Figur 55 viser at sonen ikke klarer å håndtere belastningen ved bruk av 65-TRV.



Figur 55: Noder (markert rødt) med resttrykk under 10 mVS ved bruk av 65-TRV

Figur 56 viser at Bermad ikke klarer å håndtere dette branntilfellet.



Figur 56: Noder (markert rødt) med resttrykk under 10 mVS ved bruk av Bermad

4.3.4 FASE 3 -Tosidig vannforsyning med stengte ledninger

I fase 3 vil sonen bli utsatt for ekstreme scenarioer ved å stenge kritiske ledninger fra RK55 og VP10. Fokuset er å observere hvordan ventilene virker i sammenheng med tosidig vannforsyning. Analysen er som nevnt gjort ved brann på ettermiddagstid og presenterer kun noder med lavere resttrykk enn 20 mVS.

Branntilfelle 1: Kritisk punkt med brannuttak på 20 l/s og gitt scenarioer

Med tosidig vannforsyning har sonen tilstrekkelig med trykk. Dette gjelder uavhengig av hvilke om det er konvensjonell TRV eller Bermad. Det er likevel noen observasjoner:

Brann og brann + scenario 2:

Stenging av ledning (scenario 2) som ligger i nærheten av RK55 medfører ikke store forskjeller i resttrykkverdier sammenlignet med vanlig brann i kritisk punkt. Dette ser vi fra Tabell 15. Det kan tyde på at reservoaret, VP10, sørger for mesteparten av vannforsyningen. Ingen noder har under 20 mVS i dette tilfelle.

Brann + scenario 3:

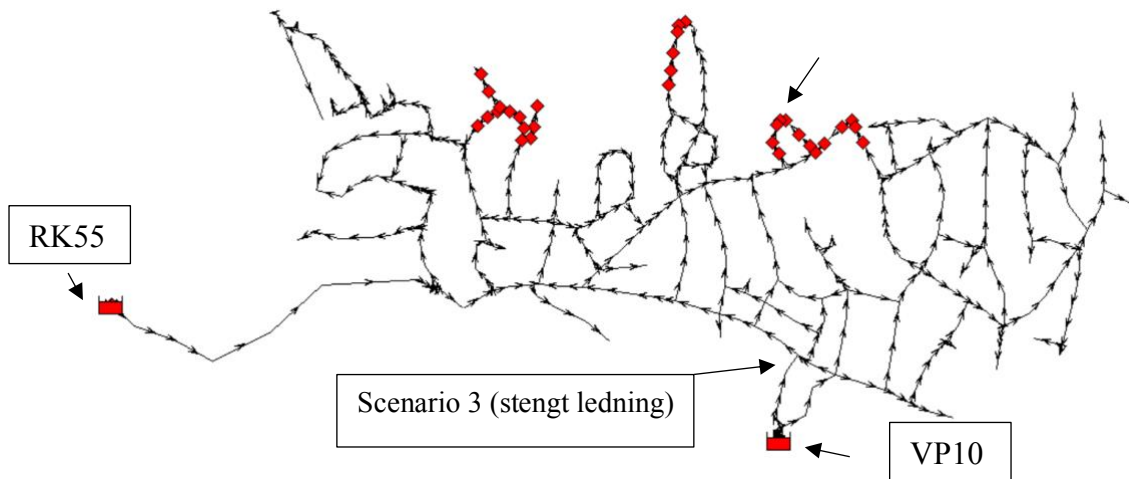
Stenging av ledning (scenario 3) anses å være kritisk for sonen. Konvensjonelle TRV'er opprettholder fortsatt opprettholde trykknivå over 24,5 mVS.

Med Bermad er konsekvensen av stengt ledning av større betydning. 31 noder i sonen har trykknivå mellom 10- 20 mVS (se Figur 57).

Tabell 15: Resttrykk [mVS] for kritiske punkt med tosidig vannforsyning

	90-TRV	65-TRV	Bermad
Brann	47.7	34.4	34.4
Brann + scenario 2	44.7	34.4	34.4
Brann + scenario 3	49.4	24.5	10.9

Brann-node

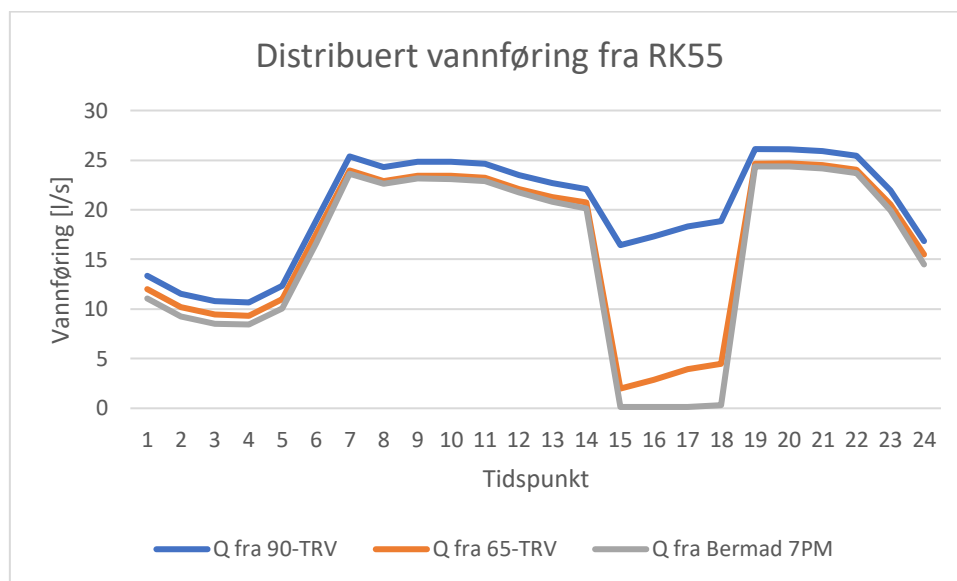


Figur 57: Noder (markert rødt) med restrykk mellom 10-20 mVS ved bruk av Bermad.

Fordeling av distribuert vann fra RK55 og VP10 ved branntilfelle 1

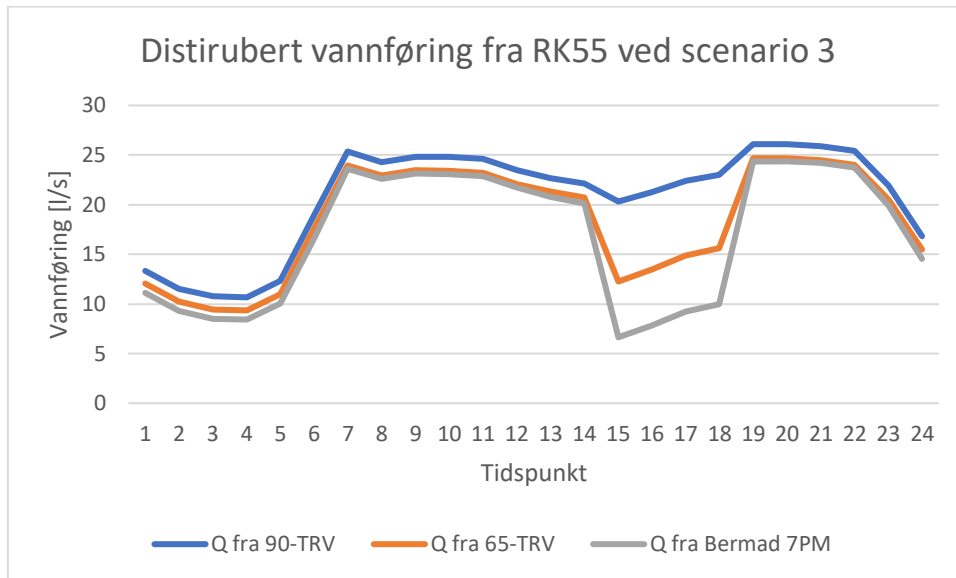
Vi undersøker nærmere på sammenhengen mellom distribuert vannføring fra ventilene og fra reservoaret, VP10.

Figur 58 viser vannføringen fra RK55 ved bruk av reservoaret VP10 for gitte ventiler. Konvensjonelle TRV'er sørger for konstant trykk uavhengig vannføringen fra VP10. Siden sonen får vannføring fra VP10, korrigerer Bermad distribuert vannmengde fra RK55. Det betyr i praksis at ventilen ikke leverer noe vann under branntilfellet, og sonen blir selvforsynt av VP10.



Figur 58: Distribuert vannføring fra RK55 uten stenging

Figur 59 viser vannføringen fra RK55 ved stengt ledning (scenario 3). Bermad kompensere for manglende trykk i sonen, men det er fortsatt VP10 som står for majoriteten av forsyningen i branntilfellet. Det gir indikasjon på at VP10 leverer mer enn det krever i sonen.



Figur 59: Distribuert vannføring fra RK55 ved scenario 3

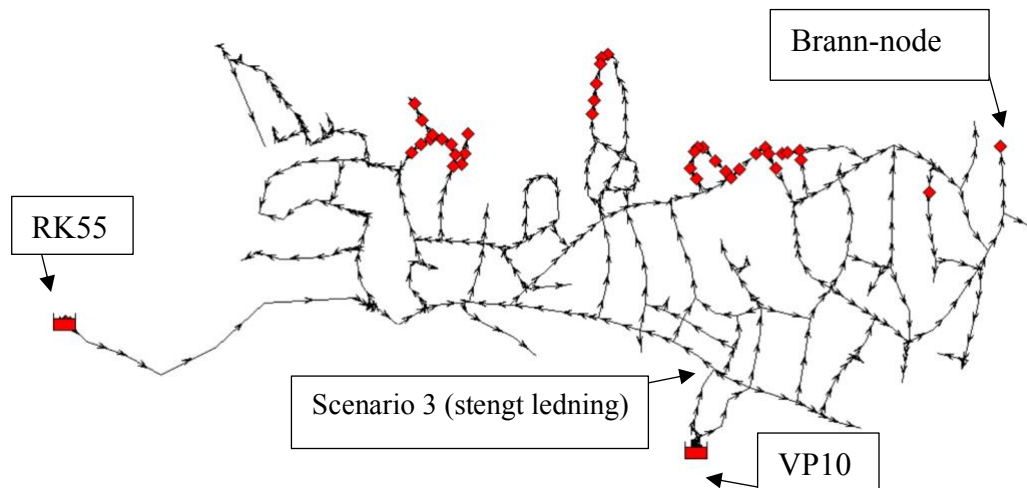
Branntilfelle 2: Småhusbebyggelse med brannuttak på 20 l/s og gitte scenarioer

Fra Tabell 16 ser vi samme trend som ved tTabell 15. Det er likehtstrekk ved brann i kritisk punkt og småhusbebyggelse. Noe av forklaringen kan være av at disse nodene befinner seg på øst-siden og det er kortere vannleveranse til VP10 enn RK55. Derfor vil det ikke bli presentert grafisk distribuert vannføring da det er unødig.

Tabell 16: Resttrykk [mVS] for brann-node med tosidig vannforsyning

	90-TRV	65-TRV	Bermad
Brann	45.1	36.6	33.7
Brann + scenario 2	44.0	36.6	33.7
Brann + scenario 3	36.1	37.3	12.2

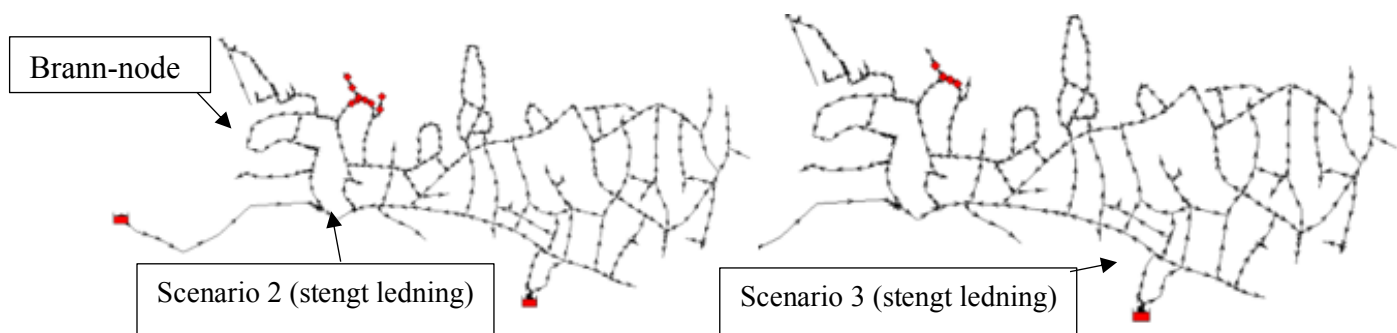
Figur 60 viser resttrykk på 10-20 mVS for utfordrende områder ved bruk av Bermad. Dette gjelder ved brann med scenario 3. Det er flere områder som blir berørt av brann i småhusbebyggelse enn i KP.



Figur 60: Noder (markert rødt) med resttrykk mellom 10-20 mVS ved scenario 3 og bruk av Bermad.

Branntilfelle 3: Leilighetsområdet med brannuttak 50 l/s og gitte scenarioer

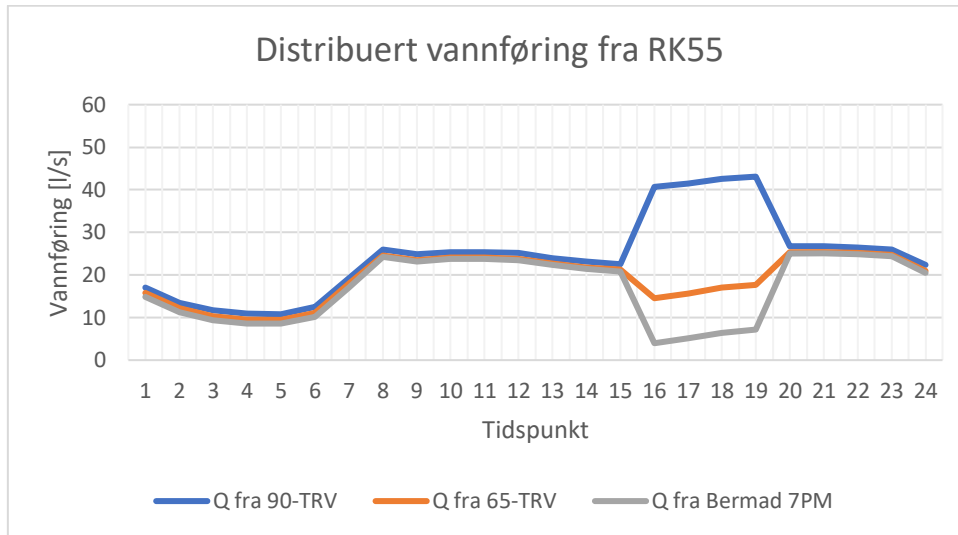
For dette branntilfelle presterer konvensjonelle TRV'er godt og leverer resttrykk over 20 mVS uavhengig av scenario. Det er kun Bermad som opplever noe lavere resttrykk (se Figur 61).



Figur 61: Bermad: Scenario 2 (t.v) er nodene 15-20 mVS. Scenario 3 (t.h) er nodene 18-20 mVS.

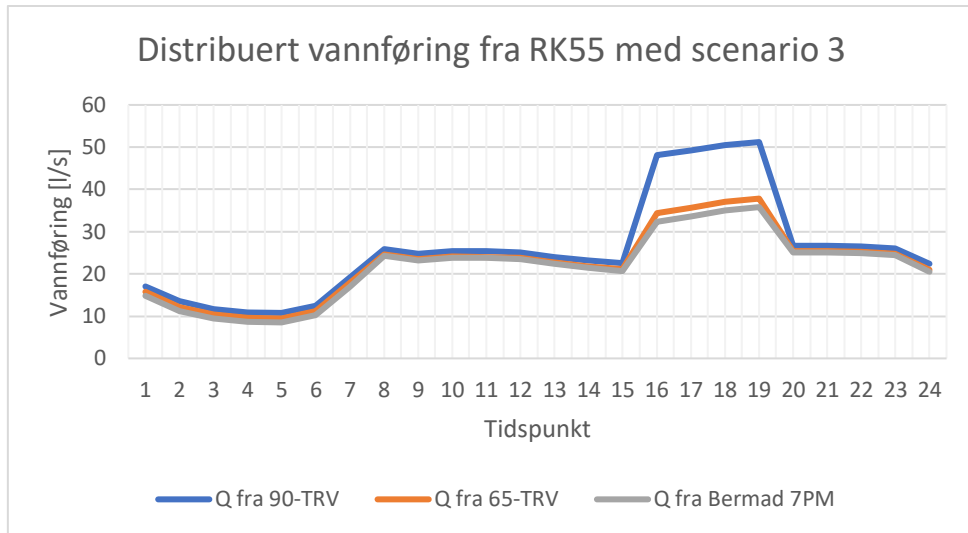
Fordeling av distribuert vann fra RK55 og V10 ved branntilfelle 3

Ved branntilfelle 3 sørger 90-TRV for å levere godt med trykk. Dette er til tross for at det er tosidig vannforsyning i sonen. Bermad og 60-TRV har lavere vannføring som tyder på at reservoaret VP10 sørger for å levere større vannføring i branntilfellet (se fFigur 62).



Figur 62: Distribuert vannføring fra RK55 ved brann i leilighetsområde med tosidig forsyning

Stenging av kritisk ledning (scenario 3) med dimensjon på 300 mm påvirker direkte trykkbilde og vannføringsstrømmene i sonen. Bermad svarer med å øke vannføringen til 16 l/s under dette forholdet og viser evnen til å regulere etter behov (se Figur 63). 90-TRV leverer fortsatt høyt trykk uavhengig av scenarioet.



Figur 63: Distribuert vannføring fra RK55 ved brann og scenario 3 i leilighetsområde med tosidig forsyning

Diskusjon og oppsummering av funksjonsanalyse

I diskusjon har trekket vi de viktigste funnene fra funksjonsanalyse og drøfter resultatet opp mot hverandre. Diskusjonen kommer til å fokusere på Bermad da det er mest relevant.

FASE 1 – Ensidig vannforsyning: Brannuttak

I fase 1 analyserte vi hvordan brannvannkapasiteten var på ulike tider av døgnet.

Fellesnevneren for alle ventilene i analysen, spesielt konvensjonelle TRV'er, har høyere brannvannkapasitet på natten og lavere senere på dagen. Forklaringen er at det er mer tilgjengelig trykk i nattestid da det ikke er noe annet forbruk. Det er en forskjell på 2-5 mVS mellom natt og ettermiddagsbrann som igjen er avhengig av ventil.

Hvis vi nå kun ser på ettermiddagsbrann, tyder observasjonene fra fase 1 at 90-TRV har god kapasitet. Med margin menes det trykkverdi over minstekravet på 10 mVS. Ventilen leverer med margin på 40 mVS. Det tilsvarer omtrent 30 mVS mer enn nødvendig. Til sammenligning tilfredsstiller 65-TRV minstekravet med margin på 6 mVS. Ut ifra funksjonsanalysen, er det grunnlag for å nedjustere nedstrøms trykket til 90-TRV men ikke mindre 65 mVS. Det vil være aktuelt å utarbeide brannvannuttak andre steder i sonen for å kunne validere om nedjustering av trykknivået er holdbart.

Bermad oppfyller minstekravet ved brannuttak. Brann i leilighetsområde har lavest margin i resttrykk sammenlignet med brann i kritisk punkt og småhusbebyggelse. Marginene er på respektive 0,6, 1,6 og 2,1 mVS. Med andre ord leverer ikke ventil mer enn det sonen krever. Ventilen fungerer etter sin hensikt men de lave marginsverdiene er bekymringsverdig dersom sonen utsettes for ytterligere belastning. Fra et driftsmessig perspektiv vil en buffer bestående av høyere leveringstrykk bidra til økt sikkerhet i vannleveransen. Senere i kapittelet vil det bli presentert forslag til ventilendring.

FASE 2 – Ensidig vannforsyning: Brannvannuttak med stengte ledninger

Observasjonene fra fase 1 gav inntrykk av at Bermad opprettholder minstekravet i brannuttak. I fase 2 viser ventilen sårbarheten når stengt hovedledning hindrer vannstrømninger og anstrenger systemet på det ytterste. Det er observert tilsvarende for 65-TRV med resttrykkverdier under 10 mVS for kritiske noder. I unntakstilfeller vil ikke disse ventilene kunne selvforsyne sonen i like grad som 90-TRV. Belastningene av stengte ledninger hindrer ikke 90-TRV med å levere 20-30 mVS over minstekravet på 10 mVS.

I en normal driftsituasjon blir ikke sonen utsatt av både brann og stengte ventiler samtidig, slik at det kan virke urealistisk. Analysen har blitt gjort for å kartlegge sårbarheten i sonen eventuelt innføre tiltak. Dersom kommunen ønsker å ta i bruk Bermad gitt verste scenario, vil det være behov for trykkforsterkere i de aktuelle nodene. Dette er strengt talt unødvendig men installasjonen kan forsvarliggjøres dersom sonen kun har tilgang til én vannforsyning. Alternativt vil endring av ventilkurven være en bedre løsning men ikke aktuelt for slike unntakstilstander. Det er viktig å understreke at fase 2 bare skulle illustrere verste scenarioer og burde ikke legge føringen på hvordan en skal dimensjonere.

FASE 3 – Tosidig vannforsyning: Brannvannuttak med stengte ledninger

I fase 3 har vi sett effekten av tosidig vannforsyning ved brann og stengte ledninger. Reservoaret, VP10, er egnet til å være back-up og forsikre om å avlaste Bermad ved nødvendighet.

Når det er sagt, er det antydning på at reservoaret/pumpen overkompenserer ved brann. I dette tilfelle blir Bermad «overdøvet» da ventiler distribuerer ikke vann under brann. Fra et driftsmessig perspektiv er ikke dette gunstig dersom pumpa/VP10 alene sørger for totalforsyningen i sonen. Det er heller ikke økonomisk forsvarlig drift. Det er høyest aktuelt nedjustere turtallet i pumpen for å komplementere de positive effektene med mengdestyrt ventil. I dette caset vil det ikke bli foreslått pumpeinnstillingen, men gjøre oppmerksom på at det kan være relevant for fremtidig drift.

Det er to faktorer som avgjør hvor aktiv Bermad er; hvor det er trykkmangel i sone og hvilke vanskeligheter (hindringer) VP10 har for å levere etterspurt trykk. Oppsummering på synergieffekter mellom Bermad og VP10:

1. Branntilfeller lengst unna RK55 – i nærheten av VP10:

Ved brann i kritisk punkt og småhusbebyggelse senker Bermad nedstrøms trykk og overlater hovedforsyningen til VP10. Resttrykket i brann-nodene er blitt redusert til minstekravet samtidig som totaltrykket i sonen er blitt lavere. Konvensjonelle TRV'er er ikke like reaktive til trykk- og elementendringene i sonen.

2. Branntilfelle (leilighetsområde) i nærheten av RK55 – lengst unna VP10:

I utgangspunktet sørger fortsatt VP10 for forsyningen i sonen, men Bermad overtar når kritiske ledninger stenger vannstrømmingen fra reservoaret.

Vurdering av framgangsmåte i funksjonsanalysen

Til å begynne med var den opprinnelige funksjonsanalysen svært komplisert og krevde mange simuleringer. Det var særlig i fase 2 mesteparten av tiden gikk ut på å stenge flere elementer som behøvdtes. Dessuten ble det forsøkt å se sammenheng mellom brannuttak og lekkasje, noe som har vist seg å være mer avansert enn antatt. Derfor har det gjort forsøk på å korte ned analysere og fokusere på sentrale scenarioer. Dette arbeidet har vært tidskonsumerende og ser i ettertid viktighet med å forenkle analysen.

Videre burde analysen inneholde branntilfeller andre steder i sonen og utført andre stress-situasjonen. Blant annet kunne analysen flere brannuttak samtidig og eventuelt fordele brannvanntapp på 50 l/s i to uttak. Analysen har kun tatt stilling til restrykk i ledningsnett. Hvor tilstrekkelig trykk det er i forhold til øverste etasje på en høyblokk, er ikke blitt vurdert.

Samlet vurdering av ventiler etter funksjonsanalyse

Ytelse/Robusthet	90-TRV	65-TRV	Bermad 7PM
Ensidig forsyning (RK55)			
Stenging av ledning(er)	Bra	Greit	OK
Brann kritisk punkt	Bra	Bra	Bra**
Brann kritisk punkt + stengte ledninger	Bra	Dårlig	Dårlig
Brann småhusbebyggelse	Bra	Bra	Bra**
Brann småhusbebyggelse + stengte ledninger	Bra	Dårlig	Dårlig
Brann – leilighetsområdet	Bra	Bra	Bra**
Brann leilighetsområde + stengte ledninger	Dårlig	Dårlig	Dårlig
Tosidig forsyning			

(RK55 + VP10)			
Brann kritisk + stengte ledninger	Bra	Bra	Bra
Brann småhusbebyggelse + stengte ledninger	Bra	Bra	Dårlig. Ventilen reagerer ikke på brannen
Brann leilighetsområde + stengte ledninger	Bra	Bra	Bra. Ventilen reagerer på brannen

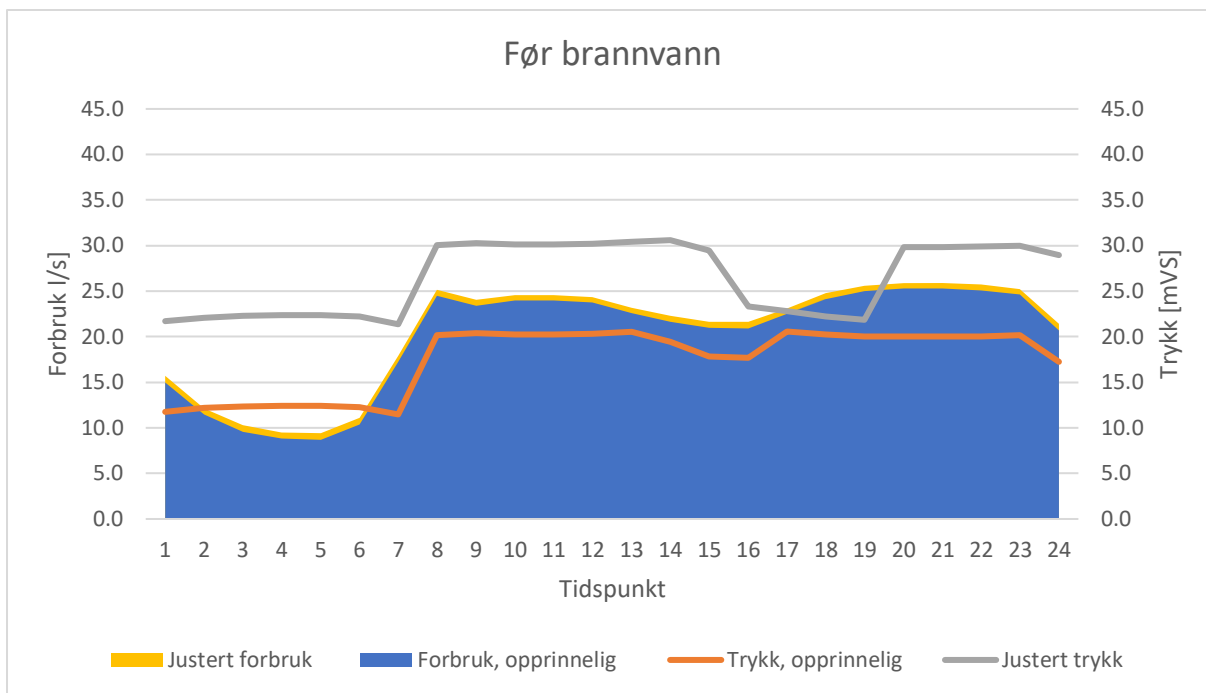
Tabell 17: Samlet vurdering av ventiler etter funksjonsanalyse

**Det er gjort oppmerksom på lite buffer i resttrykk under drøftingen.

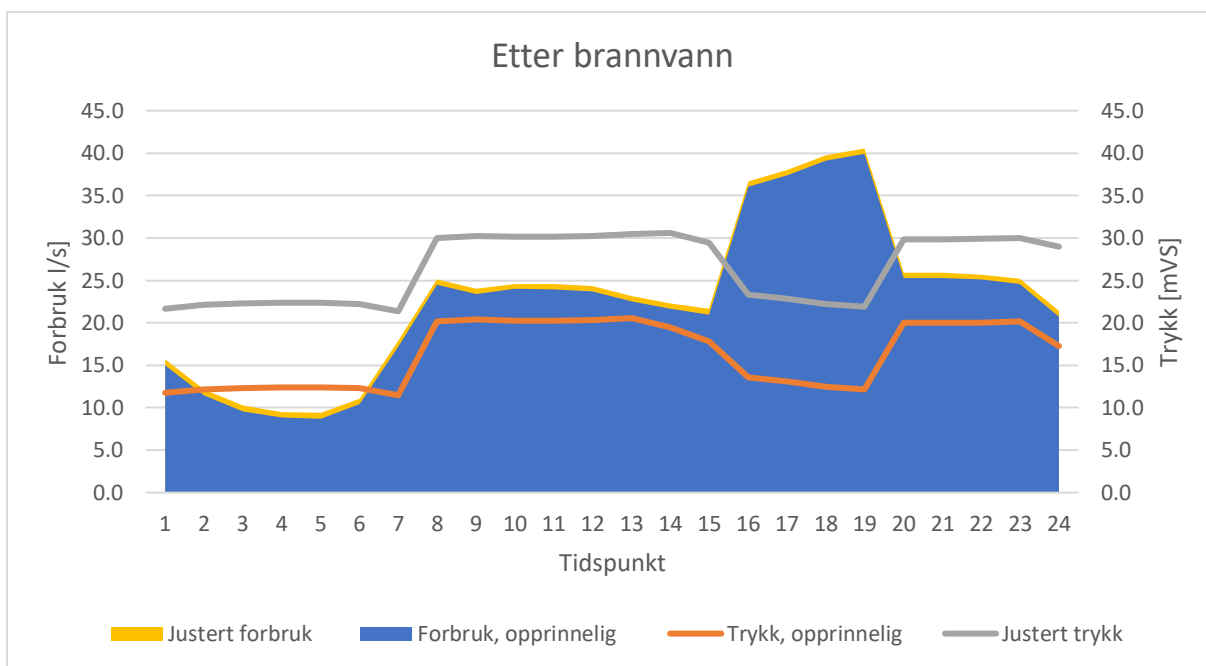
Forslag - modifisering av ventilkurven

Forslag til ventilkurven er kun tatt hensyn til brann i kritisk punkt på 20 l/s på ettermiddagen.

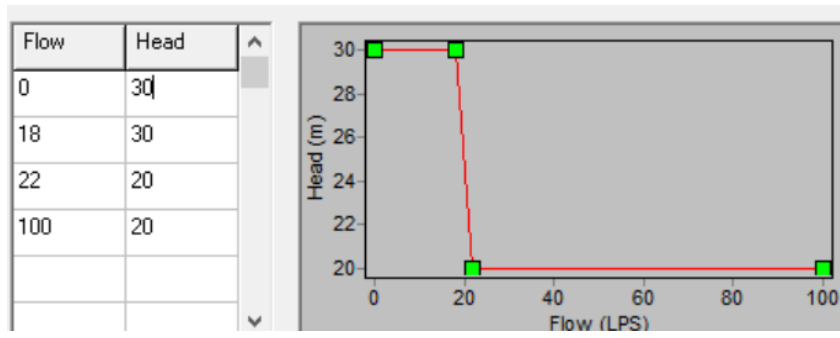
Illustrasjonen viser forskjellen mellom opprinnelig og justert ventilinnstilling. Foreslått ventilkurve skal ikke være med i økonomisk analyse da caset har fokus på reduksjonspotensial på nattetid med trykk på 10 mVS.



Figur 64: Totalforbruk og trykk i kritisk punkt før brann ved to ventilurver..



Figur 65: Totalforbruk og trykk i kritiskpunkt etter brann ved to ventilurver.



Figur 66: Foreslått trykkfallsforhold i ventil

4.4 Økonomisk analyse

Denne delen redegjør enkel kostnadsberegning knyttet til lekkasje. Beregningen er basert på den årlige lekkasjevolum for hver alternativ. I analysen blir lekkasjevolumet knyttet til 90-TRV brukt som referansepunkt til sammenligning.

4.4.1 Lekkasje kostnad per kubikkmeter

Kjent fastsette pris på lekkasje er nødvendig for å kalkulere besparelse i kroner. Estimert total kostnad forbundet med 38% lekkasjenivå er antatt å være 64,2 millioner kroner i året for Oslo kommune. Dette tilsvarer 1,69 kr kroner per m³.

Tabell 18: Beregning av lekkasjekostnad per m³

Inndata:	
Total vannproduksjon [mill m ³ /året] (oppgitt)	703
Total driftskostnader [mill kr/år] (oppgitt)	4580
Antatt driftskostnader knyttet til vannmengde i avløp [kr/m ³]	1.6
Lekkasje knyttet til vannforsyning	
Driftskostnader [mill m ³ /år]	6.5
Antatt total driftskostnader for Oslo mill [kr/år]	651.5
Antatt Total vannproduksjon [m ³ /år]	100.0
Antatt lekkasjenivå 38 % utlekk mill m ³ /år]	38.0
Mengdeavhengig driftskostnader knyttet til vannproduksjon (20 %)	
[mill kr/år]	130.3
Mengdeavhengig driftskostnader vann [kr/m ³]	1.3
= Kostnad lekkasje for vannforsyning [mill kr/år]	49.5
Lekkasje knyttet til avløp	
Antatt innlekket drikkevann 25% av lekkasje [mill m ³ /år]	9.5
Kostnad innlekket drikkevann på avløpsanlegg [mill kr/år]	14.7
= Total [mill kr/år]	64.2
= Pris per m ³	1.69

4.4.2 Driftskostnader for ventil

Driftskostnadsberegningen er basert på årlige driften som VAV opererer med ⁵. Det har ikke tatt hensyn til kostnader knyttet til inflasjon, feriepenger, sosiale kostnader og drivstoff. Det er antatt 40 km tur/retur med forbehold om at kjøreruten kan endre seg. Totalkostnaden gjelder for én ordinær trykkreduksjonsventil.

Tabell 19: Driftskostnad knyttet til ventil

Årlig faste driftskostnader:	
Antall inspeksjoner i året	4
Antall timer per gang	1
Antall ansatte	2
Gjennomsnittslønn	1000
Bilgodtgjørelse (3,5 kr per km. Det er 40 km tur/retur	560
Totalkostnad [kr/år]	8560

4.4.3 Lekkasjevolum per meter ledning og person

Lekkasjevolum har er fordelt på antall innbyggere og totale lengden for distribusjonsnett. Enhetskostnadene knyttet til lekkasje avtar desto høyere N1-verdi.

Tabell 20: Lekkasje per pers og lengde for 65-TRV

	Lekkasje ref.		65-TRV	
	90-TRV	N1 = 0.5	N1 = 1.0	N1 = 1.5
Lekkasje pr pers[m ³ /år/person]	33.3	27.3	22.8	19.2
lekkasje pr ledning [m ³ /år/meter]	11.5	9.4	7.8	6.6

⁵ Mailutveksling med Milna Mandusic (VAV)

Tabell 21: Lekkasje per person og lengde for Bermad

	Lekkasje ref.		Bermad	
	90-TRV	N1 = 0.5	N1 = 1.0	N1 = 1.5
Lekkasje pr pers[m ³ /år/pers]	33.3	25.0	19.0	14.5
lekkasje pr ledning [m ³ /år/meter]	11.5	8.6	6.6	5.0

4.4.4 Bespart lekkasjekostnad i kroner

Beregningen for bespart lekkasjekostnad er basert på antatt årlig lekkasjevolum multiplisert med pris per kubikkmeter vann. Lekkasjeandel viser forholdet mellom lekkasje og totalforbruket i sonen for hver ventil. Redusert lekkasje er beregnet med hensyn på antatt opprinnelig lekkasjetap i sonen ved 90-TRV. Innkjøpsprisen til Bermad er 117 000 kr. Det er antatt at merverdiavgift er inkludert i prisen og varierende kronekurs ikke påvirker totalprisen. Tabellene har ekskludert Bermad i beregningene da vi velger å drøfte om det senere.

Bespart lekkasjekostnad ved N1 = 0.5

Tabell 22: Bespart lekkasjekostnad ved N1 = 0.5

	90-TRV	65-TRV	Bermad
Totalforbruk [m ³ /år]	688231	646071	630128
Lekkasje [m ³ /år]	233785	191625	175682
Lekkasjeandel	34 %	30 %	28 %
Redusert lekkasje		18 %	25 %
Lekkasjekostnad [kr/år]	395096	323847	296903
Driftskostnader [kr/år]	8560	8560	8560
=Totalkostnad [kr/år]	403656	332407	305463
=Bespart lekkasje kostnad [kr/år]		71250	98193

Bespart lekkasjekostnad ved N1 = 1.0

Tabell 23: Bespart lekkasjekostnad ved N1 = 1.0

	90-TRV	65-TRV	Bermad
Totalforbruk [m ³ /år]	688231	614316	588063
Lekkasje [m ³ /år]	233785	159858	133605
Lekkasjeandel	34 %	26 %	23 %
Redusert lekkasje		32 %	43 %
Lekkasjekostnad [kr/år]	395096	270160	225792
Driftskostnader [kr/år]	8560	8560	8560
= Totalkostnad [kr/år]	403656	278720	234352
= Bespart lekkasje kostnad [kr/år]		124937	169304

Bespart lekkasjekostnad ved N1 = 1.5

Tabell 24: Bespart lekkasjekostnad ved N1 = 1.5

	90-TRV	65-TRV	Bermad
Totalforbruk [m ³ /år]	688231	589175	556354
Lekkasje [m ³ /år]	233785	134716	101895
Lekkasjeandel	34 %	23 %	18 %
Redusert lekkasje		42 %	56 %
Lekkasjekostnad [kr/år]	395096	227670	172203
Driftskostnader [kr/år]	8560	8560	8560
= Totalkostnad [kr/år]	403656	236230	180763
= Bespart lekkasje kostnad [kr/år]		167426	222894

Diskusjon av økonomisk analyse

I vår økonomisk analyse har vi utelatt noen viktige faktorer. Det ene er relasjonen mellom lekkasjetap i forbindelse med bruddfrekvens og trykkreduksjon. Lavere trykk i sonen vil belaster ledningsnettets og antall bruddfrekvenser minker. Den økonomiske besparelsen knyttet til vanntap, reparasjon og materiale ved brudd er ikke inkludert.

Det andre er at vi har sett bort fra det daglige lekkasjearbeidet knyttet til vedlikeholds- og reparasjonsarbeid. Dette vil påvirke lekkasjesituasjonen i sonen og den økonomiske beregning knyttet til det.

Besparing med permanent endring - 65-TRV

Trykknedsenking fra 90 mVS til 65 mVS vil medføre lavere lekkasjetap.

Besparelspotensialet ligger 71 250 – 167 426 kr på ett år avhengig av lekkasjeeksponenten. Denne løsningen er den billigste da det ikke krever innkjøp av materiell men et monteringsarbeid på eksisterende ventil. Det er dermed et økonomisk grunnlag for å senke driftstrykket i sonen.

Besparing med mengderegulert ventil – Bermad

Med Bermad er besparelspotensialet på 98 193 – 222 894 kr i året. Med en investeringskostnad på 117 000 kr vil dette være inntjent etter 2-14 måneder avhengig av reduksjonspotensialet. Driftskostnaden til Bermad kan høyere enn tradisjonell TRV det første året. Da ventilen er ny vil det kreve hyppigere drift og vedlikehold men også for å høste erfaring. Sammenlignet med alternativet, 65-TRV, har Bermad en merbesparelse på 20 000-60 000 kr på årlig basis.

Fra et økonomisk ståsted vil implementering av en mengderegulert ventil være lønnsomt, spesielt over lengre perioder da nytten av investeringen blir mer synlig.

5. Avslutning

5.1 Konklusjon

I denne oppgaven er målet å se på potensialet med trykkstyring med hensikt om å redusere lekkasje. I dette tilfellet har vi undersøkt en 270-soner i Oslo som er trykkregulert av en konvensjonell trykkreduksjonsventil. I dag sørger denne ventilen for 90 mVS nedstrøms. Basert på tilstandsanalysen opplever sonen et trykkgjennomsnitt på 75 mVS. Det kritiske punktet er nærmest konstant på 50 mVS. I noen områder er trykket langt over akseptabelt driftsnivå. Antatt lekkasjenivå med eksisterende ventil er 33 % og tilsvarer 233 785 m³/år. Det foreligger dermed et behov for trykkregulering.

For å besvare på problemstillingen har vi foreslått to alternativer til trykkstyring for sonen og vurdert disse med hverandre. Den ene er permanentendring. Ved å nedjustere nedstrøms trykk til 65 mVS vil sonen fortsatt beholde et akseptabelt driftstrykk på 50 mVS og 25 mVS i kritisk punkt. Ulempen med permanentendring er høyt trykk på nattestid. Dette er overskuddstrykk som kunne ha blitt bespart. Til tross for det er kan lekkasjenivået potensielt reduseres med 18 % sammenlignet med nåværende løsning. Dette er den mest konservative estimatet og tilsvarer en besparelse på 71 250 kroner i året. Ventilen opplever ikke store utfordringer ved brannuttak men vil slite dersom sonen blir anstrengt på det ytterste. Derfor er vår anbefaling at trykk nedstrøms for konvensjonell ventil bør ligge mellom 65-90 mVS. Kommunen bør vurdere hvorvidt de ønsker å redusere trykket innenfor deres interne krav, nasjonale lovbestemmelser og ikke minst unngå å skape interessekonflikter hos abonnenten.

Den andre alternativet er en dynamisk mengderegulert ventil. I dette caset har ventilen blitt innstilt for å levere det sonen behøver. Ventilen har ikke bare sørget for å levere driftsvennlig trykk, men klart å senke nattes trykket betraktelig. I motsetning til konvensjonelle TRV'er vil Bermad kunne senke nattes trykket til 12 mVS. Reduksjonspotensialet i lekkasje vil minst være på 25 % sammenligner med eksisterende lekkasje. Dette tilsvarer en besparelse på 98 193 kr i året. Med den ventillinstillingen vi har valgt i oppgaven, vil ventilen være robust under normal driftsituasjon. Ved branntilfeller har vi sett at resttrykket kan være altfor lav i forhold til hva kommunen krever. Dette er ikke et problem for ventilen som lett kan innstille for å møte det ønskelig kravet kommunen ønsker. Dette ble foreslått i resultatet.

For å understreke at forfatteren har besvart problemstillingen; Ja, det foreligger et potensial i trykkreduksjon i 270-sonen og kommunen bør vurdere å senke trykknivået i kampen mot

lekkasjereduksjon. En mengderegulert ventil vil over lenger tid innhente den økonomiske vinningen og er ut ifra oppgaven det mest fortrukne alternativet.

5.2 Selvrefleksjon og ettertanke

Oppgaven har vært krevende på mange måter. For det første er oppgaven teknisk og det har skapt utfordringer knyttet til modellering. Dessuten har jeg klart å gjøre oppgaven vanskelig enn det behøver å være. Blant annet hadde det holdt med én modell istedenfor tre. Dette har ført at jeg har brukt mer tid enn antatt til parallellsimulering og dokumentere observasjonene. Dette har resultert til at jeg måtte utelukke andre planlagte analyser. Til tross for disse utfordrende har det vært spennende og lærerikt under hele skriveprosessen.

5.3 Veien videre

I fremtiden vil det vært interessant å betrakte lekkasje med FAVAD-konsept framfor potensregelen. På denne måten vil resultatene være mer realistiske. Dette caset har ikke tatt med bruddfrekvenser og hvilke effekter det vil ha ved redusert trykk. For å forstå den totale effekten av trykkreduksjon, vil det være hensiktsmessig beregne reduksjon i kostnad og lekkasje knyttet til færre reparasjon, vedlikehold og lekkasjesøking.

Når det er analysert et spesifikt område vil det være begrensinger på hvor overførbar erfaringen vil være for andre områder. Da dette studiet har vært tids- og stedsavhengig, vil det være en oppfordring å teste andre soner for å høste kompetanse. Det vil også være interessert å teste soner med flere ventiler og hvilke synergieffekter det har med hverandre.

Jeg oppfordrer til å se på muligheten for sesongbasert styring for aktuelle soner og eventuelt en driftsplan på hvordan dette kan utføres. Til slutt vil jeg anbefale en drifts- og økonomisk analyse for dagens situasjon kontra optimal lokasjon og antall PRV i sonen. Dette er særlig populært i internasjonale studier og det hadde vært lærerikt å kunne utdype mer om dette.

Litteraturliste:

- AbdelMeguid, H. & Ulanicki, B. (2010). Pressure and leakage management in water distribution systems via flow modulation PRVs. I: *Water Distribution Systems Analysis 2010*, s. 1124-1139.
- Araujo, L. S., Ramos, H. & Coelho, S. T. (2006). Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management*, 20 (1): 133-149. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-006-4635-3>.
- Asplan Viak. (2018). Lekkasjereduksjon på vannledningsnettet.
- Bosnjakovic, M. (2018). Lekkasjeredksuon på vanddistribusjonsnettet - Strategi for Oslo kommune.
- Cassa, A. M., van Zyl, J. E. & Laubscher, R. F. (2010). A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*, 7 (2): 109-120. doi: 10.1080/15730620903447613.
- Cobacho, R., Arregui, F., Soriano, J. & Cabrera, E. (2015). Including leakage in network models: an application to calibrate leak valves in EPANET. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 64 (2): 130-138. doi: 10.2166/aqua.2014.197.
- DHI. (2017). Mike Urban - Water distribution.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Tilgjengelig fra: https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/15/ji/15-5/?_t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCf9%3d%3d&_t_q=trykk&_t_tags=language%3ano%2c siteid%3aa8fed669-6208-4354-8fe6-9c93cb91a133&_t_ip=85.167.108.205%3a59664&_t_hit.id=EPiServer_Templates_DIBK_PageTypes_Veiledninger_ParagrafPageType/_067f3dd0-e627-4e01-b04b-d6f62f782a50_no&_t_hit.pos=4.
- Ellefsen, T. (2016). Erfaring med senking av trykk om natten i Trondheim kommune.
- Farley, M., Water, S., Supply, W., Council, S. C. & Organization, W. H. (2001). *Leakage Management and Control: A Best Practice Training Manual*: World Health Organization.
- Farley, M. & Trow, S. (2003). *Losses in Water Distribution networks*. 1. utg. London, UK. : IWA publishing.
- Ferrante, M., Massari, C., Brunone, B. & Meniconi, S. (2013). Leak behaviour in pressurized PVC pipes. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13 (4): 987-992. doi: 10.2166/ws.2013.047.
- Flatin, A. (2009). Erfaringer med lekkasjekontroll. *Norsk Vann*.
- FN. (2020). FNs bærekraftsmål.
- Foundation, A. R. (2007). Leakage Management Technologies
- Germanopoulos, G. & Jowitt, P. (1989). LEAKAGE REDUCTION BY EXCESS PRESSURE MINIMIZATION IN A WATER SUPPLY NETWORK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87 (2): 195-214.
- Gupta, A., Bokde, N., Kulat, K. & Yaseen, Z. M. (2020). Nodal Matrix Analysis for Optimal Pressure-Reducing Valve Localization in a Water Distribution System. *Energies*, 13 (8). doi: 10.3390/en13081878.
- Kløve, M. (2010). Vurdering lekkasjenivå
- Lambert, A. (2001). *What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems*. IWA Conf. n Systems approach to leakage control and water distribution system management.
- Lambert, A. & Thornton, J. (2005). *Progress in Practical Prediction of Pressure: Leakage, Pressure: Burst Frequency and Pressure: Consumption Relationships*. Leakage 2015, Halifax, Canada.: IWA Special Conference.

- Lindholm, O. G., Bjerkholt, J.T. & Lien, O. (2012). Fremmedvann i nordiske avløpsledningsnett.
- Mandusic, M. & Amundstad, R. O. (2020). Evalueringsrapport - Dynamiske trykkreduksjonsventiler.
- May, J. (1994). Pressure dependent leakage. *World water and Environment Engineering*.
- McKenzie, R. & Wegelin, W. (2009). *Implementation of pressure management in municipal water supply systems*. EYDAP Conference “Water: The Day After”, Greece.
- Norsk Vann. (2019). *Prisen for vannlekkasjer - presisering* Tilgjengelig fra: <https://www.norskvann.no/index.php/10-nyheter/2180-prisen-for-vannlekkasjer---presisering> (lest 18.02.20).
- Oslo VAV. (2015a). Hovedplan vannforsyning 2015-2030.
- Oslo VAV. (2015b). Rehabiliteringsplan vannledningsnettet 2015-2030.
- Roshani, E. & Filion, Y. (2014). WDS leakage management through pressure control and pipes rehabilitation using an optimization approach. *Procedia Eng*, 89: 21-28.
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2.0 USERS MANUAL.
- Saldarriaga, J. & Salcedo, C. A. (2015). Determination of optimal location and settings of pressure reducing valves in water distribution networks for minimizing water losses. *Procedia Engineering*, 119: 973-983. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.986>.
- Sterling, M. J. H. & Bargiela, A. (1984). Leakage reduction by optimised control of valves in water networks.
- Suribabu, C. R. (2015). Emitter based approach for estimation of nodal outflow to pressure deficient water distribution networks under pressure management. *Scientia Iranica*.
- Tanyimboh, T. T. & Templeman, A. B. (2010). Seamless pressure-deficient water distribution system model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 163 (8): 389-396. doi: 10.1680/wama.900013.
- Thornton, J. (2003). Managing leakage by managing pressure: a practical approach *IWA water Loss Task Force*.
- Thornton, J., Sturm, R. & Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control*: McGraw-Hill Education.
- Trifunovi, N. (2015). *Introduction to Urban Water Distribution*: Taylor & Francis/Balkema.
- Van Zyl, J. & Clayton, C. (2007). The Effect of Pressure on Leakage in Water Distribution Systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 160 (2): 109-114. doi: <https://doi.org/10.1680/wama.2007.160.2.109>.
- van Zyl, J. E. (2014). Theoretical Modeling of Pressure and Leakage in Water Distribution Systems. *Procedia Engineering*, 89: 273-277. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.187.
- Walski, T. M., Chase, V. D., Savic, D. A., Grayman, M. W., Beckwith, S. & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution And Management*. 1. utg.: Haestad Methods.
- Ziegler, D. (2011). Guidelines for water loss reduction.
- Ødegaard, H., Lindholm, O., Heistad, A. & Thorolfsson, T. S. (2014). *Vann- og avløpsteknikk*. 2 utg.

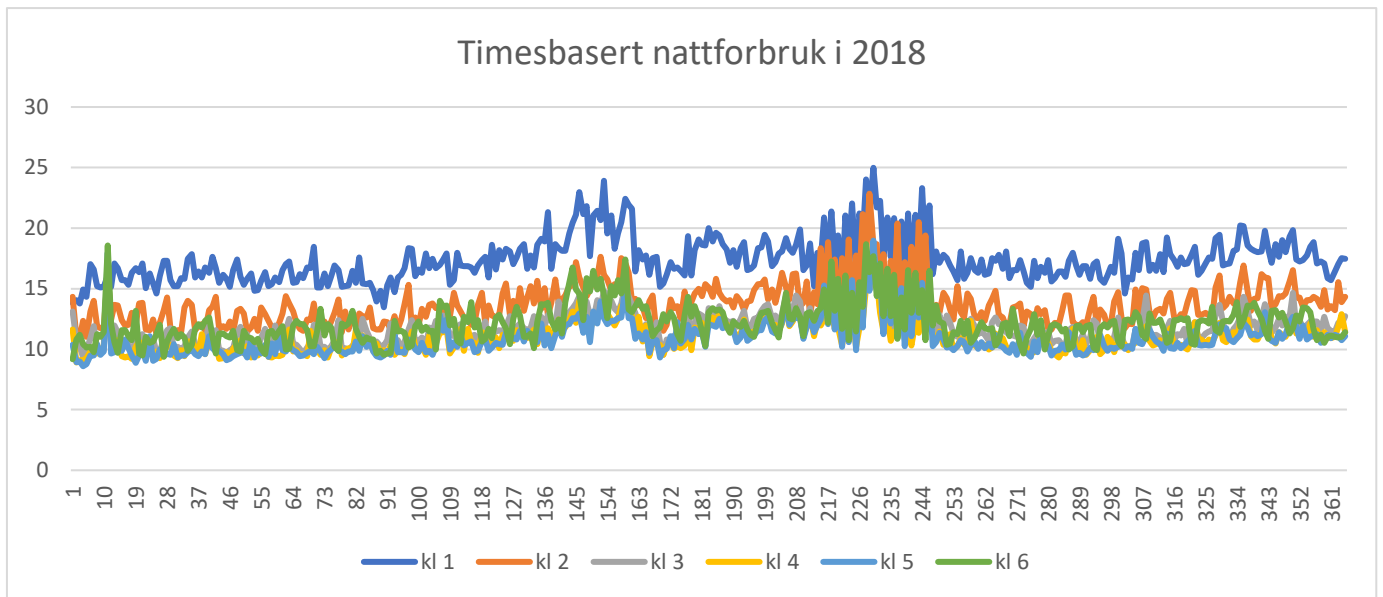
Vedlegg

Avvik fra døgnforbruk, Q_{ref} , under kalibrering

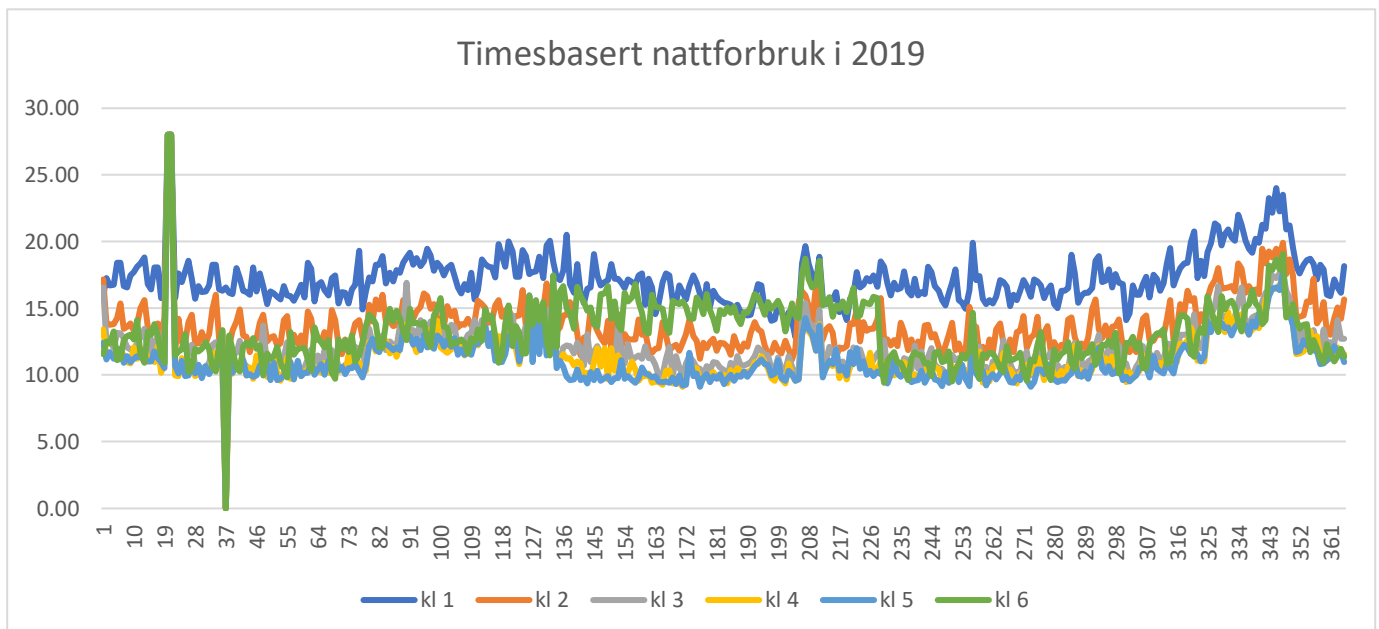
Avvik fra døgnforbruk under kalibreringen

Tid	N1 = 0.5	N1 = 1.0	N1 = 1.5
1	-0.1 %	0.1 %	-0.7 %
2	0.4 %	-1.2 %	-0.7 %
3	-1.2 %	-0.4 %	-0.6 %
4	-0.8 %	-0.3 %	-0.8 %
5	-1.3 %	0.2 %	-0.4 %
6	-1.2 %	-0.1 %	0.0 %
7	0.4 %	-0.2 %	0.2 %
8	-0.5 %	-0.4 %	-0.6 %
9	0.5 %	-0.3 %	-0.3 %
10	0.4 %	0.0 %	-0.6 %
11	-0.5 %	0.1 %	-0.5 %
12	-0.2 %	0.2 %	-0.6 %
13	0.5 %	0.0 %	-0.6 %
14	0.9 %	-0.2 %	-0.4 %
15	-0.7 %	0.9 %	0.3 %
16	-0.6 %	-0.1 %	0.3 %
17	-0.2 %	0.3 %	-0.4 %
18	-0.8 %	0.0 %	-0.5 %
19	0.8 %	1.2 %	0.4 %
20	-0.4 %	0.3 %	-0.3 %
21	1.8 %	-0.7 %	1.9 %
22	-0.2 %	-0.7 %	-0.3 %
23	0.2 %	0.4 %	0.3 %
24	0.9 %	-0.8 %	-0.5 %

Timesbasert nattforbruk



Gjennomsnittlig/median nattforbruk for 2018						
Tidspunkt	01	02	03	04	05	06
Median	17.1	13.5	11.7	10.7	10.6	11.9
Gjennomsnitt	17.4	13.7	11.8	11.0	10.9	12.1



Gjennomsnittlig/median nattforbruk for 2019						
Tidspunkt	01	02	03	04	05	06

Median	16.9	13.6	11.7	10.9	10.6	13.0
Gjennomsnitt	17.2	13.8	12.1	11.3	11.1	13.3

Trykkbilde ved N1 = 1,0

	Trykksituasjon			
	Hele sonen		Kritisk punkt	
	0.4	0.7	0.4	0.7
90 PRV	76.3	74.4	51.7	49.4
65 PRV	51.4	49.6	26.8	24.7
GPV	37.0	45.0	12.5	20.6

Trykkbilde ved N1 = 1,5

	Trykksituasjon			
	Hele sonen		Kritisk punkt	
	0.4	0.7	0.4	0.7
90 PRV	75.0	74.6	51.7	49.4
65 PRV	51.6	49.9	27.0	25.1
GPV	37.1	45.4	12.5	20.6

Reduksjon i totalforbruk i løpet av døgnet

Tidsintervaller på dagen. N1 =1,0

		00-03	0400-0700	0800-1100	1200-1500	1600-1900	2000-2300
Lav	65-TRV	23 %	20 %	14 %	15 %	14 %	14 %
	Bermad						
	7PM	36 %	32 %	23 %	24 %	22 %	22 %
Normal	65-TRV	18 %	15 %	9 %	10 %	9 %	9 %
	Bermad						
	7PM	28 %	23 %	11 %	14 %	11 %	11 %
Høy	65-TRV	15 %	12 %	7 %	7 %	7 %	7 %

Bermad

7PM 23 % 18 % 8 % 9 % 8 % 8 %

Tidsintervaller på dagen. N1 = 1.5

		00-03	0400-0700	0800-1100	1200-1500	1600-1900	2000-2300
Lav	65-TRV	31 %	27 %	19 %	21 %	19 %	19 %
	Bermad						
	7PM	46 %	40 %	29 %	31 %	28 %	28 %
Normal	65-TRV	24 %	22 %	12 %	13 %	12 %	12 %
	Bermad						
	7PM	36 %	32 %	15 %	19 %	15 %	15 %
Høy	65-TRV	20 %	17 %	9 %	10 %	9 %	9 %
	Bermad						
	7PM	30 %	23 %	10 %	12 %	10 %	10 %

Rørsammensetning for sone 270

Innsendt av VAV

Material	Lengde i meter	%
Støpejern,grått	14 453	71 %
Støpejern,duktilt	2 233	11 %
Polyet. høy dens	3 659	18 %
Polyet,uspes	43	0 %
	20 388	

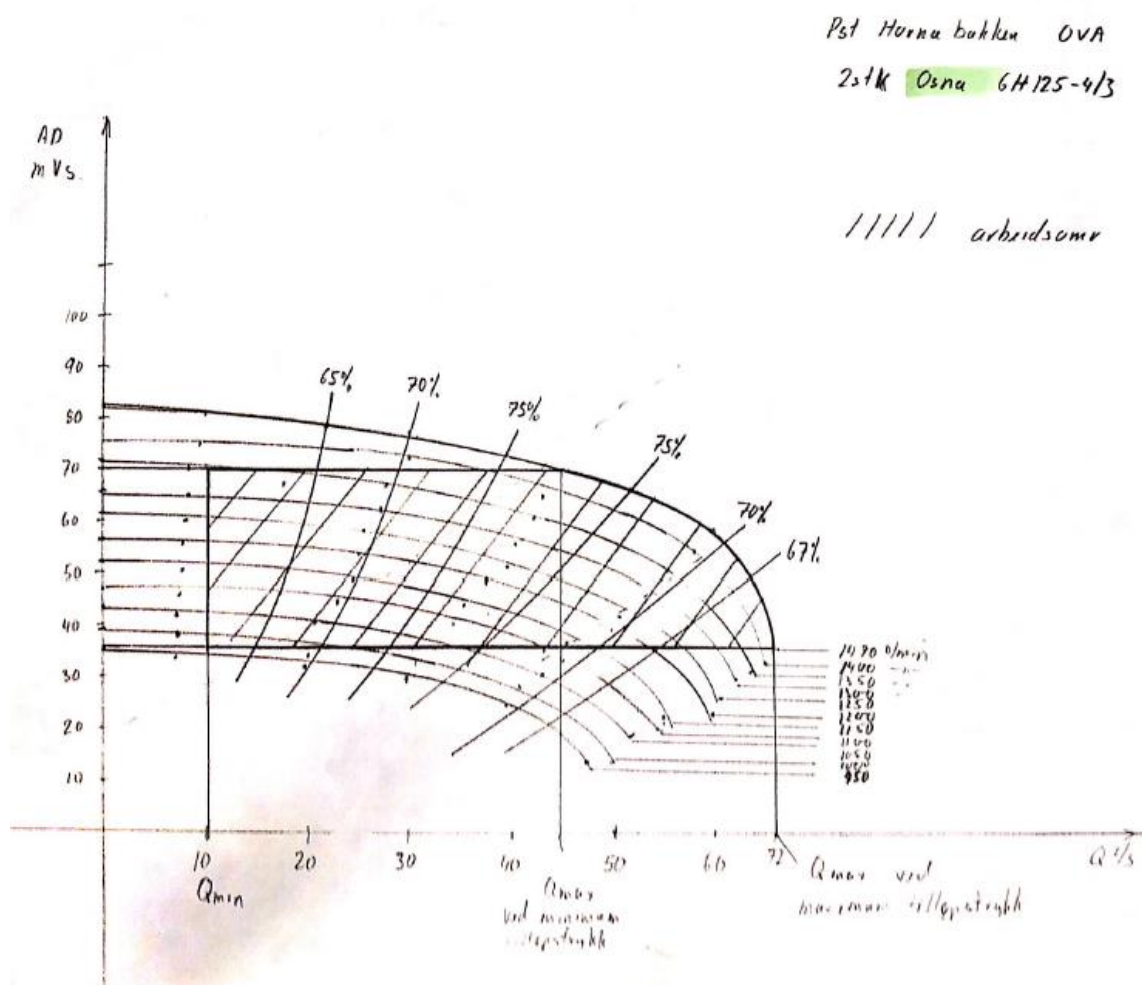
Stipulert forbruk og anslått lekkasje i 270-sonen

Innsendt av VAV

Hva	Data
Målinger i sonen	VP3_FT1
Innbyggere	7.014 (409.618)
Stipulert forbruk	416.424 m ³ /år
Målt forbruk	735.855 m ³ /år
Målt mini nattflow	11 l/s
Ønsket min nattflow	3,5 l/s
Anslått vanntap ca.	7 l/s (232.245 m ³ /år)

Pumpekarakterstikk for VP10

Innsendt av VAV



Ventilbeskrivelse Bermad 7PM

Hentet fra produktbrosjyre på bermad.com

Bermad modell 7PM



Technical Data

Size Range: DN40-900 ; 1 1/2"-36"

End Connections (Pressure Ratings):

Flanged: ISO PN16, PN25 (ANSI Class 150, 300)

Threaded: BSP or NPT

Others: Available on request

Valve Patterns: "Y" (globe) & angle, globe (DN600-900 ; 24"-36")

Working Temperature: Water up to 80°C ; 180°F

Standard Materials:

Body & Actuator: Ductile Iron

Internals: Stainless Steel, Bronze & coated Steel

Diaphragm: Synthetic Rubber Nylon fabric-reinforced

Seals: Synthetic Rubber

Coating: Fusion Bonded Epoxy, RAL 5005 (Blue) approved for drinking water or Electrostatic Polyester Powder

Differential Pressure Calculation

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{(Kv; Cv)} \right)^2$$

ΔP = Differential Pressure for fully open valve (bar; psi)

Q = Flow rate (m³/h; gpm)

Kv = Metric system - valve flow coefficient
(flow in m³/h at 1 bar ΔP with 15°C water)

Cv = US system - Valve flow coefficient
(flow in gpm at 1 psi ΔP with 60°F water)

$Cv = 1.155 Kv$



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway