

Analyse av det avskjærende pumpesystemet i Midtbyen i Trondheim

Vegar Nordal

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Sveinn T Thorolfsson, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven handler om det avskjærende avløpssystemet i Midtbyen i Trondheim. Systemet består av en pumpeledning og fire pumpestasjoner som tar imot spillvann og overvann fra størstedelen av Trondheim sentrum samt Brattøra. Ledningen fører vannet fra kote ca. 2,6 meter gjennom Midtbyen til Ilsvika påslippstunnel på kote 13,5 meter, som tar vannet videre ved selvføll til Høvringen Renseanlegg.

Oppgaven beskriver hvordan systemet er bygget opp og inkluderer informasjon om ledningstraseen, pumpestasjonene, pumpene og dekningsområde. Det har vært foretatt gjentatte befaringer på stasjonene for å installere trykkmålere og for å gjennomføre testkjøring av anlegget. Testkjøringen er gjennomført for å skaffe data om anleggets funksjon ved full belastning og trykksvingninger ved pumpestopp.

Arbeidet bygger videre på et forstudium utført av undertegnede høsten 2014. I forstudiet ble det identifisert en uoverensstemmelse mellom forventet trykkehøyde ut i fra en pumpekaraktistikk og beregnet trykkehøyde ut i fra energitap langs ledningen. Det ble foreslått å installere trykkmålere i pumpestasjonene for å avklare problemstillingen.

Arbeidet med å finne egnede trykkmålere og planlegge installasjon tok mye tid fra januar 2015, før de fysisk var på plass i mars, takket være stor velvillighet og assistanse fra Trondheim Kommune. Trykkmålinger ble tilgjengelig i EAdata fra 27. april 2015. EAdata er et utmerket system for overvåkning og driftskontroll. En kan eksempelvis umiddelbart se når en pumpe virker dårlig og krever ettersyn.

Overvåkningssystemet EAdata, med nyetablerte trykkmålinger, er i dette arbeidet brukt til å analysere anleggets funksjon gjennom sammenligninger mellom beregnede og målte data. Beregningsresultatene kommer fra to modeller som er etablert.

En falltapsmodell, som ble påstartet i prosjektoppgaven, er blitt utviklet videre utover våren. Modellen beregner energilinjer for en stasjonær strømningsstilstand langs hovedtrykkledningen, ved pumpene og i punktene der trykkgiverne er installert. Den tar hensyn til ledningsfriksjon, singulærtap, tap i tilbakeslagsventiler og tap i møtende rør i pumpestasjonene. Tap i møtende rør er behandlet relativt inngående og viser mellom annet at tapet langs hovedtrykkledningen kan være negativt når en sterk pumpe leverer vann inn på ledningen. Pumpen tilfører energi. Hovedresultatet fra simuleringer med falltapsmodellen er at den viser betydelig lavere tap langs ledningen enn målt. Vannet møter tydeligvis større strømningsmotstand enn ordinær falltapsteori og normale parametere for tap skulle tilsi.

Det er også laget en modell for å beskrive transient strømnings og trykkstøt i hovedtrykkledningen. Modellen er laget i programmet HYTRAN (Lawgun, 2015). Metoden og teorien programmet benytter seg av er studert og beskrevet. Pumpestopp etter testkjøring med full kapasitet er simulert. De simulerte trykkstøtene er sammenlignet med trykkmålingene og hovedtrekkene i beregningene er det samme som i målingene. Spesielt samstemmer de umiddelbare trykkfallene etter pumpestans godt. De målte trykkene dør derimot for raskt ut. Det er grunn til å tro at målingene grunnet manglende oppløsning ikke fanger opp de svingningene som faktisk opptrer og som HYTRAN i prinsipp viser.

Trykkmålingene har gitt interessante resultater. Det er likefullt noe usikkerhet knyttet til nøyaktigheten i trykkmålingene. Det kan synes som usikkerheten er større enn ± 1 mVs, som er oppgitt som maksimal usikkerhet fra produsent. Nøyaktigheten er kontrollert ved analyse av måleverdiene for et tilfelle med en stillestående vannstreng i ledningen opp til kote 13,5 meter. Det er et avvik på opptil 3-4 mVs mellom målt og forventet verdi. Dette avviket kan være knyttet til en nullpunkts- fastsettelse. Kalibrering av målerne slik de nå står i stasjonene er ønskelig. Et annet problem er at EAdata viser trykk mot tid etter pumpestopp som en kantet kurve med konstante trykk i overraskende lange perioder. Det kan synes som om det til tider er kø i dataoverføringen slik at en ikke får en kontinuerlig registrering. Dette bør undersøkes.

Målingene av trykk og mengde vann fra pumpene samsvarer godt med pumpekaraktistikkene. Spesielt gjelder dette pumpekaraktistikken til pumpene på Brattørbrua der pumpet vannmengde er størst. Dette gir tiltro til hovedtrenden i trykkmålingene.

Det er funnet et betydelig avvik mellom målte trykk og trykk beregnet ut fra falltapsmodellen når normale falltapskoeffisienter er benyttet. Dette kan ha sammenheng med luft eller sedimentering i anlegget slik at tilgjengelig rørtverrsnitt reduseres. Dette forhold er belyst og diskutert.

ABSTRACT

This Master thesis is about the pressurized interceptor pipe system serving downtown Trondheim. The system consists of a continuous, pressurized main receiving sewage from four pumping stations. From pumping stations at about 2, 6 meters elevation the main delivers sewage at elevation 13,5 meter to a rock tunnel transporting the sewage by gravity to a treatment plant in Høvringen.

The thesis describes how the system is built and presents information on the location of the pipe in vertical and horizontal view, how the pumping stations works, their pumps and includes brief considerations of related catchments and volumes of sewage. The pumping stations are visited in connection with work aiming to install pressure gauges on the main and for performing a full capacity test run of the system. The test runs have provided data for comparison with numerical simulations of stationary and transient flow.

The work builds on a pilot study performed fall 2014 indicating that the hydraulic head in the stations were higher than predicted by a simple hydraulic loss calculation when comparing to the pump characteristic curves. It was suggested to install pressure gauges to confirm this suspicion.

From early January 2015 work began to find appropriate pressure sensors and to have them installed. This made pressure readings available in EAdata from 27th April 2015 thanks to assistance from the municipality of Trondheim. The EAdata control and surveillance system is well suited for checking if pumps are working properly. It may also be used for studying how the system works both for stationary and transient conditions as is done in this work by comparing measurements to results from modelling.

A hydraulic loss model is established in Excel to calculate the energy line (hydraulic potential) along the line as a function of given discharges from pumps. The model considers friction losses in pipes, singular losses in bends, loss in check valves etc. Comparing measurements to simulations for the full capacity test-run concludes that the measured loss is higher than the simulated even when high loss coefficients are used in the simulations. This confirms the findings from fall 2014.

A model for simulating water hammer and transient flow is made in HYTRAN. The theory behind the program is presented. The HYTRAN model includes pumps and air pressure tanks in the pumping stations coupled to the main. The model is used to simulate what happens when the pumps are shut down after a period of stationary flow. The simulations pick up the transients seen in measured pressures at the stations but while the pressure oscillations die out early in the measured curves the oscillations continue in the simulations.

This may be related to the fact that the pressure transducers have limited accuracy. The producer specifies ± 1 mVs but studies of measurements from a period of no pumping when the pipe rises to zero pressure at 13,5 meters indicates lower accuracy. This may be a zero offset problem. Another issue is seen in the pressures for transient situations where the measured curves are uneven and jump from one constant value to another. This may indicate a queue in the data acquisition system preventing continuous registration of data. This should be investigated further and the sensors should be recalibrated.

The measurements of pressures or heads at the pumps correspond well with the pump characteristic curve for Brattørbrua during full capacity testing. Brattørbrua is the station that has the highest pumped volumes of water during the test. The correspondence provides some confidence to the measurements.

A considerable discrepancy between measured and calculated heads along the main using conventional head loss theories is found. This may indicate that there are sediments or large pockets of air in the main. The problem is studied and discussed.

FORORD

Denne masteroppgaven i «Vann- og avløpsteknikk» er utført våren 2015 ved Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU. Arbeidet er utført under veiledning av førsteamanuensis Sveinn T. Thorolfsson.

Oppgaven omhandler det avskjærende trykkavløpssystemet i Midtbyen i Trondheim som ble satt i drift i desember 1995.

I min prosjektoppgave høsten 2014 ble det avdekket at det var et behov for å få målt trykk i hovedtrykkledningen under drift. Trykkmålere ble på denne bakgrunn installert, og undertegnede har vært tungt involvert i dette arbeidet. De første data med trykkmålinger ble tilgjengelige 27. april 2015.

Jeg vil rette en stor takk til Trondheim kommune ved Kyrre Anton Halvorsen og Andreas Ellingsson i Kommunalteknikk i Trondheim Kommune og Asbjørn Mellemsæther i Trondheim bydrift, pumpegrupper. De har gitt tilgang til dokumentasjon av anlegget gjennom kart og tegninger. Flere befaringer i regi av pumpegrupper er gjennomført og disse har vært veldig nyttig. Tilgang til EAdata har vært avgjørende for å forstå anleggets funksjon. Takk til Dagfinn Sten i firma IPJ for hjelp med installasjon på min pc og veiledning og oppdateringer av data. Jeg vil takke Gunnar Mosevoll og Kaspar Vareide for gode råd vedrørende installering av trykkmålere.

Denne oppgaven er valgt på grunn av stor interesse for hydraulikk og et ønske om fordypning innen pumpeteknikk. Arbeidet har vært svært interessant og lærerikt.

En stor takk til svigermor Marit Sødermann og min mor for korrekturlesning av oppgaven. Jeg ønsker ikke minst å takke min far for gode diskusjoner og tips rundt oppgaven.

Jeg vil rette en spesiell takk til Sveinn T. Thorolfsson for god tilrettelegging, tett oppfølging og solid støtte gjennom hele arbeidet med masteroppgaven. Thorolfsson har motivert og inspirert meg under hele arbeidet og var den som formidlet kontakt med Trondheim Kommune.

INNHOOLD

1	INNLEDNING	1
1.1	Oppgaveformulering	1
1.2	Avgrensning av oppgaven	2
1.3	Resultater fra arbeid høsten 2014	2
1.4	Rapportens innhold	2
2	BESKRIVELSE AV TRYKKAVLØPSSYSTEMET I TRONDHEIM SENTRUM	4
2.1	Historisk bakgrunn	4
2.2	Hovedtrykkledningen: trasé, profil og materialer	4
2.3	Pumpestasjonene.....	6
2.4	Pumper	11
2.5	Dekningsområde og vannmengder.....	16
3	TEORI OG METODE FOR MODELLERING AV SYSTEMET	21
3.1	Falltap	21
3.2	Falltapsmodell stasjonær strømning.....	29
3.3	Transient strømning	34
3.4	Modellering av transient strømning - Hytran	39
3.5	Sedimentering og selvrensing	41
3.6	Ansamling av luft i ledningen.....	42
4	TIDLIGERE OG NY INSTRUMENTERING AV ANLEGGET	45
4.1	Om EAdata	45
4.2	Tilgjengelig informasjon i EAdata	46
4.3	Arbeid for å etablere trykkmålinger på stasjonene	46
5	ANLEGGETS FUNKSJON VURDERT UT I FRA MÅLTE DATA	53
5.1	Normal drift.....	53
5.2	Testkjøring med full kapasitet	58
5.3	Strømforbruk	65
6	SIMULERINGER MED FALLTAPSMODELL FOR STASJONÆR STRØMNING	67
6.1	Hydraulisk potensial, beregnet og målt energilinje langs hovedledningen	67
6.2	Sensitivitetsanalyse, friksjonstap og singulærtap	69
6.3	Beregnete ledningskarakteristikker	69
7	SIMULERINGER MED DYNAMISK MODELL FOR TRANSIENT STRØMNING	71
7.1	Input til HYTRAN	71
7.2	Resultater fra dynamiske beregninger med HYTRAN	72
8	DRØFTING	75
8.1	Trykkmålinger	75
8.2	Observasjoner fra EAdata.....	75
8.3	Falltapsmodell for stasjonær strømning	77
8.4	Transient strømning	77
8.5	Luft eller sedimenter i ledningen	78
9	KONKLUSJON	80

VEDLEGG

Vedlegg A: Automatisert regneark for utregning av friksjonskoeffisient etter Moodys diagram

Vedlegg B: Data fra pumpetest og pumpekarakteristikk for Flygt pumpe

FIGURER

Figur 1 Avskjærende avløpssystem for midtbyen i Trondheim (Trondheim kommune, 1996). Hovedtrykkledning er vist ved gul linje og gravitasjonsledninger i rødt.	1
Figur 2 Felles hovedtrykkledning i kartplan. Trykkledning lagt med gamle Trondheims-koordinater. Trykkledning vist som rød linje og pumpestasjoner er angitt med svarte firkanter.	4
Figur 3 Oversikt over hovedtrykkledningen i profil. Koter etter nytt Trondheimssystem. Ledningen vist ved rød linje ut fra koordinater fra detaljert kartgrunnlag. Pumpestasjonene er vist ved svarte firkanter mens terrengnivå er vist ved grønn stiplet linje.	5
Figur 4 Grøftesnitt fra seksjon Lillegata - Ilsvikøra. Trykkledningen ligger øverst til venstre i grøfta, mens en selvfallsledning som går til nærmeste pumpestasjonen ligger i bunn (Trondheim Kommune, 1995).	6
Figur 5 Frostakaia pumpestasjon plan på nivå med trykkledningen, øvre plan rørkjeller (Trondheim Kommune, 1995). Forklaring og farge er lagt til plantegningen.	7
Figur 6 Frostakaia pumpestasjon Snitt A-A, med pumpeump og pumpeplassering (Trondheim Kommune, 1995). Toppetasjen på bakkenivå er ikke vist. Koter gitt i gammelt lokalt Trondheims-system. Legg til 0,89 meter for å få nye koteverdier. Forklaringer og farge er lagt til snittet.	8
Figur 7 Frostakaia pumpestasjon Snitt B-B, med selvfallsledning, sandfang og trykkluftstank på trykkledningen (Trondheim Kommune, 1995). Forklaringer og farge er lagt til snittet.	9
Figur 8 Beliggenhet av pumpestasjonene med tilkoblede ledninger (Gemini, 2015).....	10
Figur 9 To av pumpene som er installert i anlegget (Foto VN)	12
Figur 10 Pumpekarakteristikk Sulzer (ABS) FB 100/100-32 V (Olsen, 2015).....	13
Figur 11 Pumpekarakteristikk Sulzer (ABS) FB 80/80-26 RV (Olsen, 2015).....	14
Figur 12 Pumpekarakteristikk for Flygt 3202.180 (Mellemsæther, 2015). Pumpekarakteristikken er den nedadgående grafen mens den oppadgående er energiforbruk.	15
Figur 13 Beregnet virkningsgrad for Flygt pumpe på Brattørbrua pumpestasjon basert på pumpetest	15
Figur 14 Inndeling i avløpsfelt, Midtbyen avløpssone (Asplan Viak, 2006).....	16
Figur 15 Hydrogram av 10 års regn som viser fordrøyningsvolumet inn til tre pumpestasjoner. Beregningene er gjort i Nivanett av Reinertsen (Asplan Viak, 2006).	19
Figur 16 Moody diagram i original versjon fra 1944 (Moody, 1944)	22
Figur 17 (a) og (b) Prinsippskisse for tilbakeslagsventil med kule og stengning basert på gravitasjon, (Socla, 2012). (c) Tilbakeslagsventil på Brattørbrua pumpestasjon (Foto VN).	24
Figur 18 Falltapsdiagram for tilbakeslagsventiltypen Socla 408 for åpen ventil (Socla, 2012)	24
Figur 19 Tilpassing av formler for falltap i tilbakeslagsventiler 125 mm og 150 mm med utgangspunkt i avleste punkter hentet fra Figur 18. Formlene er benyttet i regneark for falltap ved stasjonær strømning.	25
Figur 20 T rør (Bassett, et al., 2001).....	26
Figur 21 Falltap ved overgang fra pumperør til hovedledning. Standrørene er bøyd i fartsretningen for å vise sum av trykkhøyde og hastighetshøyde. Standrørene er ikke vist i målestokk.	27
Figur 22 Brattørbrua pumpestasjon med trykkmåler og pumpe tilkoblinger (Foto VN)	28
Figur 23 Illustrasjon av beregnet falltap og trykkforskjeller internt i Brattørbrua pumpestasjon for pumpet vannmengde 50 l/s fra begge pumpene.....	29
Figur 24 Første del av regneark for stasjonær falltapsmodell. Verdier som er satt inn er hentet fra testkjøring 12. mai 2015.	31
Figur 25 Andre del av regneark for stasjonær falltapsmodell. Verdier som er satt inn er hentet fra testkjøring 12. mai 2015.	32
Figur 26 Eksempel på beregningsresultater fra stasjonær falltapsmodell laget i Excel. Verdier som er satt inn er hentet fra testkjøring 12. mai 2015.	33
Figur 27 Pumpeanlegg med luftputekammer (Mosevoll, 1988).....	35
Figur 28 Trykkstøt ved pumpestop med og uten luftputekammer (Mosevoll, 1988)	35
Figur 29 Luftputekammer på	37

Figur 30 Luftputekammer på	37
Figur 31 Luftputekammer på	38
Figur 32 Tilkobling i mellom	38
Figur 33 Hovedtrykkledningen og de fire pumpestasjonene opptegnet i Hytran	40
Figur 34 HYTRAN, Dialogbokser for informasjon om (a) pumper og (b) trykkluftstanker	41
Figur 35 Sedimentering i ledning	42
Figur 36 Forskjellige strømningsmønster for luft i ledninger (Escarameia, 2005)	43
Figur 37 Skisse over tenkt luftrør koblet til høybrekk på en trykkledning.	43
Figur 38 Kritiske hastigheter for luft i hellende ledning (Escarameia, 2005).....	43
Figur 39 Hovedtrykkledningen i profil med lokale høydepunkt utsatt for ansamling av luft	44
Figur 40 Oversiktsbilde fra EA- data (a) og prosessbilde fra Frostakaia pumpestasjon (b) (Paul Jørgensen AS, 2015).....	45
Figur 41 Montering av trykkmåler på Brattørbrua pumpestasjon (Foto VN)	48
Figur 42 Kuleventil som brukt på	49
Figur 43 Piezo resistiv trykkmåler, Danfoss.....	49
Figur 44 Ventil og montert trykkmåler på Frostakaia (Foto VN)	49
Figur 45 Ventil for trykkmåler på Lillegata (Foto VN).....	49
Figur 46 Ventil for trykkmåler Ilsvikøra	50
Figur 47 Ventil i Ilsvikøra påslippstunnel (Foto VN)	50
Figur 48 Oppstart av trykkmålingene (Paul Jørgensen AS, 2015).....	50
Figur 49 Målinger av trykk og vannmengde i Brattørbrua pumpestasjon 27. april 2015	51
Figur 50 Brattørbrua pumpestasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30	53
Figur 51 Frostakaia pumpestasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30.....	54
Figur 52 Lillegata pumpestasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30	55
Figur 53 Ilsvikøra pumpestasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30	56
Figur 54 Målte vannmengder 27. april fra klokken 18:40 til 19:40. Akkumulerte vannmengder langs ledningen sammenliknet med Ilsvikøra påslippstunnel	57
Figur 55 Trykkmålinger 27. april 2015 fra klokken 18:40 til 19:40	58
Figur 56 Brattørbrua pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30	58
Figur 57 Frostakaia pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30	59
Figur 58 Lillegata pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30	60
Figur 59 Ilsvikøra pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30	61
Figur 60 Målte vannmengder 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30	62
Figur 61 Trykkmålinger 12. mai 2015 fra klokken 10:30 til 12:30.....	62
Figur 62 Faktisk driftspunkt for Brattørbrua. «Head» og vannmengde vist i pumpekarakteristikk	63
Figur 63 Faktisk driftspunkt for Frostakaia. «Head» og vannmengdevist i pumpekarakteristikk.....	64
Figur 64 Faktisk driftspunkt for Lillegata. «Head» og vannmengdevist i pumpekarakteristikk	64
Figur 65 Faktisk driftspunkt for Ilsvikøra. «Head» og vannmengdevist i pumpekarakteristikk	65
Figur 66 Energiforbruk middel 2010 – 2014 for hver stasjon	66
Figur 67 Strømforbruk i stasjonene i 2014	66
Figur 68 Resultat fra falltapsmodell og målinger. Beregnet trykk i grønt, målt trykk i blått	68
Figur 69 Potensial på Brattørbrua som funksjon av varierende tapsfaktorer	69
Figur 70 Ledningskarakteristikker Brattørbrua når ingen andre stasjoner pumper inn avløp inn på hovedtrykkledningen	70
Figur 71 Grafisk visning av simulering av pumpestopp på Brattørbrua og Frostakaia	72
Figur 72 Simulerte trykk alle stasjoner etter pumpestopp på Brattørbrua 12. mai 2015	72
Figur 73 Trykkmålinger fra hovedtrykkledningen på alle stasjonene etter pumpestopp 12. mai 2015	73
Figur 74 Simulerte og målte svingninger etter pumpestopp på Brattørbrua og Frostakaia 12. mai 2015.....	74

TABELLER

Tabell 1 Informasjon om seksjonene i hovedtrykkledningen, ut fra opplysninger i arkiv og lengder beregnet ut fra detaljerte kart (Trondheim Kommune, 1995).....	6
Tabell 2 Oversikt over type pumpe og tilbakeslagsventiler.....	11
Tabell 3 Antall personer, personekvivalenter og mengde vann for dimensjonering av pumper og ledninger for det avskjærende avløpssystemet i Midtbyen (Trondheim kommune, 1996)	17
Tabell 4 Resultater fra beregninger knyttet til Hydrogram, Figur 15 (Asplan Viak, 2006).....	18
Tabell 5 Totale vannmengder og overløp i 2004 (Asplan Viak, 2006)	20
Tabell 6 Ruhet for forskjellige materialer (Torben, et al., 2007)	21
Tabell 7 Verdier for ulike singularkoeffisienter for 90° bønd (Torben, et al., 2007)	23
Tabell 8 Utregninger av falltap og trykkforskjeller internt i Brattørbrua pumpe-stasjon for pumpet vannmengde 50 l/s fra begge pumpene. Trykkforskjell mellom måler og utgående ledning er $(-0,12 \text{ mVs} - 0,09 \text{ mVs}) = -0,21 \text{ mVs}$. Betegnelser fra (Bassett, et al., 2001).....	28
Tabell 9 Selvrengingskriterier for fylte rør med verdier av τ , for $D = 200 - 1000 \text{ mm}$, (Lysne, 1976). Verdiene i tabellen kan benyttes som selvrengingskriterie for fylte rør. For ledninger med opp til 10 % motfall er 10 % økning av hastigheten tilstrekkelig	42
Tabell 10 Tilgjengelig informasjon som framkommer i EAdata fra hver pumpe-stasjon og trykkledning	46
Tabell 11 Vurdering av målenøyaktighet til trykkmålerne ut fra stasjonær tilstand uten pumping	51
Tabell 12 Vannmengder og head i pumpene basert på målinger på hovedtrykkledningen	63
Tabell 13 Målte vannmengder og målte trykk i ledningen ved testkjøring 12. mai 2015: Kolonnen «målt» potensial er målt trykk + ledningens kotehøyde i stasjonen (varierer +2,6 til +2,8m).....	67
Tabell 14 Beregnet og «målt» potensial langs hovedtrykkledningen samt differanse i potensial som også er differanse i vanntrykk mellom målt og beregnet vanntrykk.....	68
Tabell 15 Beregnet og «målt» tap for hver seksjon langs hovedtrykkledningen	69
Tabell 16 Inndata knyttet til ledningsseksjoner mellom stasjonene	71
Tabell 17 Inndata knyttet til pumper (øverst i tabell) og trykkluftstanker på stasjonene (nederst i tabell)	71

1 INNLEDNING

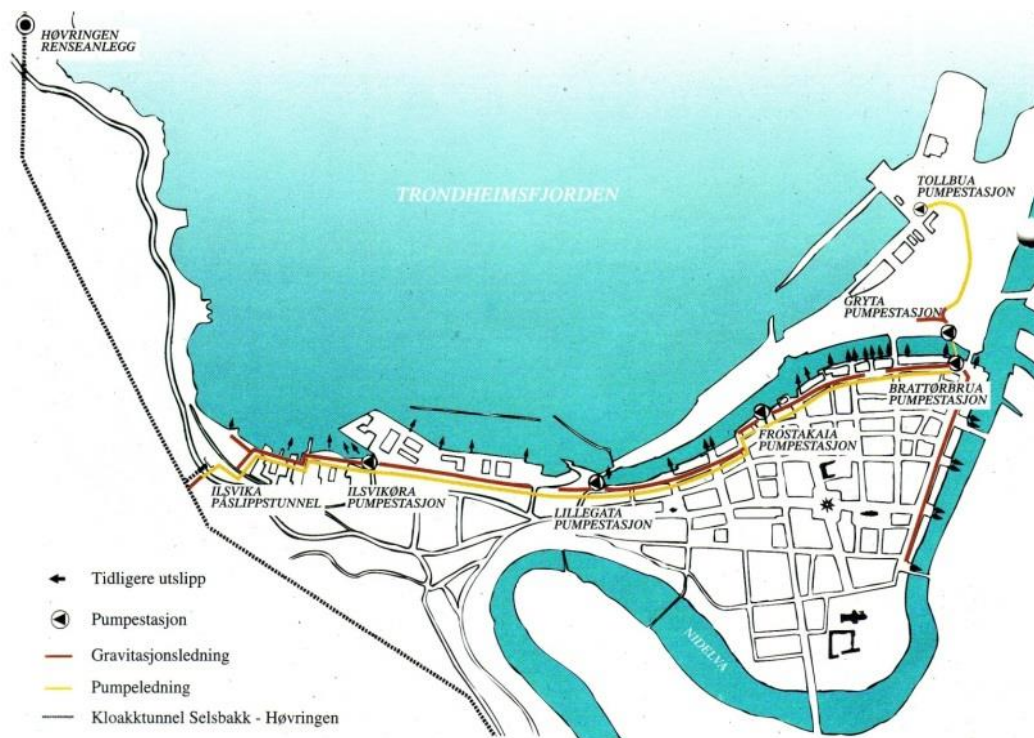
1.1 Oppgaveformulering

Denne masteroppgaven er utført som en del av 10. semester i MSc studiet i Bygg og Miljøteknikk ved Institutt for vann og miljøteknikk. Oppgaven er knyttet til det avskjærende avløpssystemet i Midtbyen i Trondheim med fokus på trykkledningen fra Brattørbrua pumpestasjon til dens utløp i Ilsvika påslippstunnel som går mot Høvringen renseanlegg. Det er fire pumpestasjoner på ledningen, se Figur 1.

Oppgaven består innledningsvis i å sette seg inn i hvordan anlegget i hovedsak er bygget opp med vekt på nøkkelinformasjon om ledninger, stasjoner og pumper. Overvåkningssystemet «EAdata» gir innsikt i den faktiske oppførselen av anlegget og oppgaven er basert på tilgang til data fra dette overvåkingssystemet.

Masteroppgaven bygger videre på et forstudium utført av undertegnede høsten 2014. I den forbindelse ble det identifisert en uoverensstemmelse i mellom forventet trykkehøyde ut fra en pumpekaraktistikk og beregnet trykkehøyde ut fra energitap. Energilinja samstemte ikke med løftehøyden til pumpene på Brattørbrua pumpestasjon ved målt vannmengde ut fra pumpekaraktistikken. Det er av interesse å finne årsaken til denne forskjellen og det er derfor ønskelig med målinger av trykket i ledningen. Arbeid knyttet til etablering av trykkmålere er sentralt. Videreutvikling av en falltapsmodell fra prosjektoppgaven vil være viktig.

Ut fra dette består oppgaven i å analysere funksjonen til det avskjærende trykkavløpssystemet i Midtbyen i Trondheim. Analysen skal ta utgangspunkt i eksisterende målinger i EAdata supplert med data fra eventuelle trykkmålinger. Trykkstøt og svingninger i systemet er av stor interesse fordi det forteller mye om hvordan anlegget fungerer og hvilke belastninger det utsettes for ved pumpestart og pumpestopp. Målinger av trykk vil gjøre det mulig å sammenligne beregnede trykkstøt med målte trykkstøt.



Figur 1 Avskjærende avløpssystem for midtbyen i Trondheim (Trondheim kommune, 1996). Hovedtrykkledning er vist ved gul linje og gravitasjonsledninger i rødt.

1.2 Avgrensning av oppgaven

Hovedfokus i denne oppgaven er på pumpeledningen og pumpestasjonene, og funksjonen av dette trykkbaserte avløpssystemet.

En rekke tilgrensende problemstillinger er ikke vurdert i denne oppgaven. Dette gjelder blant annet grundige vurderinger og beregninger av dimensjonerende mengder spillvann og overvann. Det er ikke laget noen modell for beregning av overvannsmengder for dimensjonering av ledning og fordrøyningsvolum. En beregning av overvannsmengder kan baseres på det tilhørende nedslagsfelt ved en urbanhydrologisk betraktning. Det er kun inkludert enkle beregninger og en kort beskrivelse av dekningsområdet. Denne oppgaven baserer seg på målte vannmengder slik det framgår i EAdata.

Selvfallsledninger og avløpssystemet som munner ut i pumpestasjonene er ikke vurdert. Selvfallsledningene er ikke del av denne oppgaven, det samme gjelder pumpestrekningen fra Brattøra via Gryta pumpestasjon som leverer til pumpeumpen på Brattørbrua pumpestasjon.

I denne oppgaven er det ikke blitt gjort noen grundig vurdering av utslippsmengder i overløp eller forurensinger knyttet til dette. Det er heller ikke sett på mengder partikler i spillvannet med tanke på slitasje av pumper.

1.3 Resultater fra arbeid høsten 2014

Masteroppgaven bygger videre på et forstudium fra høsten 2014. Arbeidet ble gjennomført under veiledning av Sveinn T. Thorolfsson, som også formidlet kontakt med Trondheim kommune. Trondheim kommune oversendte høsten 2014 dokumentasjon og informasjon om systemet. Det ble gitt tilgang til EAdata og store mengder kartdata. Trondheim bydrift ved pumpegruppa i Trondheim Bydrift, (PTB), stilte opp ved befaring på pumpestasjonene.

Det ble brukt mye tid til å få oversikt over registreringene i EAdata. En forenklet falltapsmodell ble etablert i prosjektet høsten 2014. Den ble anvendt på registreringer for en periode med mye regn og en energilinje for systemet ble beregnet. Beregningene indikerte at energilinja ikke samstemte med løftehøyden til pumpene på Brattørbrua pumpestasjon ved målt vannmengde ut i fra pumpekarakteristikken. Beregnet trykkehøyde ved pumpen på Brattørbrua pumpestasjon var ca. 26,5 meter mens målt pumpekarakteristikk for 50 l/s fra en pumpe tilsvarer en løftehøyde på nesten 37 meter. En sentral problemstilling i denne masteroppgaven er denne tilsynelatende uoverensstemmelsen mellom forventet trykkehøyde ut fra pumpekarakteristikk på Brattørbrua pumpestasjon og beregnet trykkehøyde ut fra ledningens utløpshøyde og energitap.

I møte den 21. januar 2015 med Trondheim Kommune ved Andreas Ellingsson og Kyrre Halvorsen og veileder Sveinn T. Thorolfsson ble problemstillingen diskutert og undertegnede ble bedt om å forberede trykkmålinger og følge opp gjennomføring i samarbeid med Trondheim Bydrift og andre involverte.

1.4 Rapportens innhold

Kapittel 2 i denne rapporten inneholder en beskrivelse av trykkavløpssystemet i Trondheim sentrum, med historisk bakgrunn, trasé i kartplan og profil og beskrivelse av pumper, pumpekarakteristikker og pumpestasjoner. Det er inkludert en beskrivelse av dekningsområdet til hovedtrykkledningen og enkle beregninger for spillvann- og overvannsmengder.

Kapittel 3 beskriver teori og metode for modellering av systemet gjennom en falltapsmodell og en modell for transient strømming. Modellene er etablert for å gi innsikt i anleggets funksjon og virkemåte. Falltapsmodellen er et egenutviklet Excel ark, mens transient-modellen benytter et kommersielt numerisk verktøy HYTRAN.

Kapittel 4 presenterer EAdata og arbeidet for å etablere trykkmålinger på stasjonene og vurdering av målenøyaktighet av trykkmålingene.

Kapitlene 5, 6 og 7 presenterer måle- og beregnings-resultater.

Kapittel 5 omhandler en analyse av anleggets funksjon ut i fra trykkmålinger og vannmålinger. I kapittel 6 er beregningsresultater ut fra falltapsmodellen vist. Beregningsresultater fra modell for transient strømning er presentert i kapittel 7.

En oppsummerende drøfting er gitt i kapittel 8.

Konklusjoner ut i fra resultatene og drøftingen er trukket i kapittel 9.

2 BESKRIVELSE AV TRYKKAVLØPSSYSTEMET I TRONDHEIM SENTRUM

Dette kapittelet omhandler beskrivelse av systemet og inkluderer trasé, pumpestasjoner og pumper, samt dekningsområdet til hovedtrykkledningen. Det er ikke fokusert mye på overvannberegninger, men dette kapittelet inneholder en kort orientering og refererer i stor grad til tidligere rapporter som omhandler kapasitet knyttet til overvann.

2.1 Historisk bakgrunn

Fram til 1990 - tallet gikk avløpsvann fra Trondheim sentrum urensert ut i Nidelva og Kanalen. Arbeidet med å fjerne utslipp til Nidelva ble startet omkring 1970, (Trondheim kommune, 1996). Det ble lagt avskjærende selvfallsledninger både langs elva og kanalen fra 1989 for å kunne samle opp og føre direkte utslipp til rensesanlegg i stedet for resipient. Ledningene ble ført fram til pumpestasjoner for pumping til rensesanlegg gjennom en felles trykkledning. Arbeidet med trykkledningen og pumpestasjonene langs Kanalen ble påbegynt i mars 1993 og satt i drift i desember 1995 (Trondheim kommune, 1996).

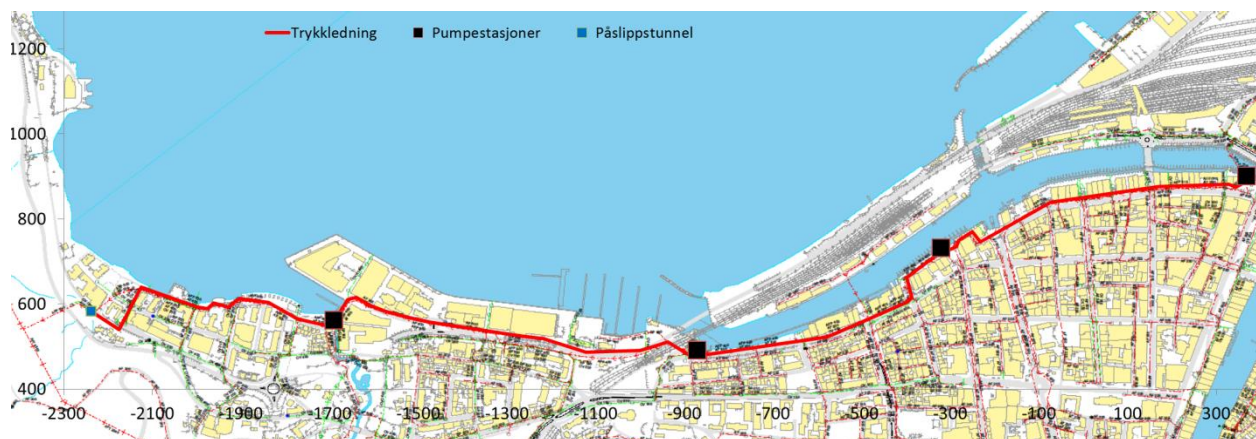
I Midtbyen består avløpsnett i bykjernen hovedsakelig av et fellessystem, mens Brattøra og deler av avløpsfeltet betegnet Lillegata har separatsystem.

Selvfallsledningene i Midtbyen bærer preg av tidligere praksis med å lede avløpsvann bestående av spillvann og overvann til nærmeste resipient. Dette er grunnen til at det har vært relativt tett med utslippspunkter langs Nidelva og Kanalen. Noen av disse utslippene fungerer i dag som overløp (Asplan Viak, 2006).

Midtbyen og Ila var det siste store området i byen som ble tilknyttet et rensesanlegg (Asplan Viak, 2006).

2.2 Hovedtrykkledningen: trasé, profil og materialer

Det avskjærende trykkavløpssystemet for Midtbyen i Trondheim består av en ca. 3 km lang felles pumpeledning. Pumpeledningen starter ved Brattørbrua pumpestasjon og går langs Fjordgata og videre langs Sandgata og Nedre Ila helt til pumpeledningen ankommer Ilsvika påslippstunnel, som er koblet til Høvringen kloakktunell. Det er fire pumpestasjoner som pumper inn vann på den felles pumpeledningen. Disse pumpestasjonene er henholdsvis Brattørbrua pumpestasjon, Frostakaia pumpestasjon, Lillegata pumpestasjon, og Ilsvikøra pumpestasjon. Avløpsvannet fra Brattøra pumpes til Gryta pumpestasjon som igjen pumper kloakk inn til pumpeumpen i Brattørbrua pumpestasjon. Gryta pumper fra stasjon til stasjon og er ikke en del av den felles pumpeledningen.



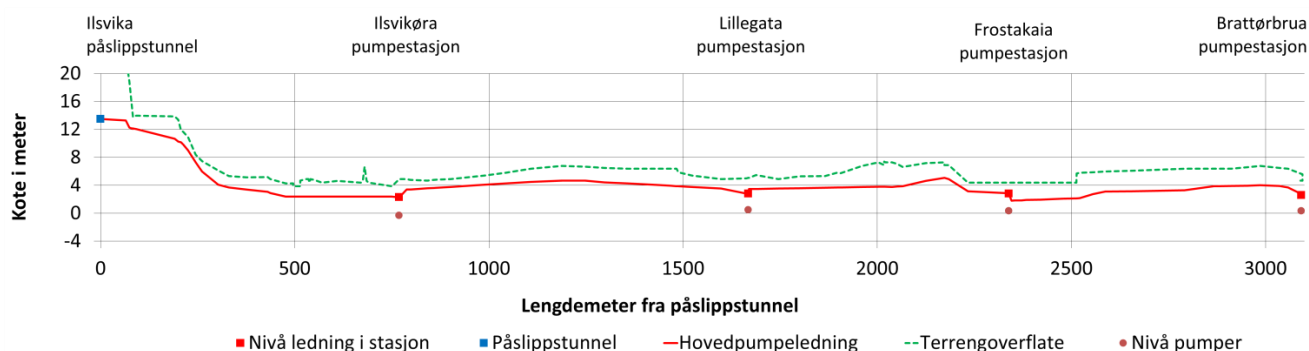
Figur 2 Felles hovedtrykkledning i kartplan. Trykkledning lagt med gamle Trondheims-koordinater. Trykkledning vist som rød linje og pumpestasjoner er angitt med svarte firkanter.

Det går gravitasjonsledninger med kloakk inn til hver pumpestasjon fra tilhørende deler av Trondheim sentrum. Anlegget tar inn avløpsvann fra størstedelen av Trondheim sentrum med unntak av et mindre felt fra Domkirka til Ila langsmed Nidelva. Dette feltet dekkes av en separat pumpeledning som går over Øya/Nidarø.

Figur 2 er utarbeidet basert på en lang rekke koordinater tatt ut av detaljerte kart datert perioden 1993-1996, tilsendt fra Trondheim kommune. Pumpestasjonenes plassering er vist med svarte firkanter. Strekningene mellom pumpestasjonene er angitt i Tabell 1. Strekningene er beregnet ved å addere korte rette strekninger mellom koordinat-punktene. De korte rette strekningene er beregnet ved hjelp av Pytagoras. Ledningen har markerte retningsendringer flere steder. Retningsendringene er til dels store og tilsvarer betydelige bend i ledningen. Bendene bidrar til falltap i ledningen. Koordinatsystemet som er brukt er det gamle, lokale Trondheimssystemet med origo i Domkirkespiret.

Det samme detaljerte kartgrunnlaget med høyde-angivelser er benyttet for å tegne opp en oversikt over vertikalprofilen langs ledningen, Figur 3. Mange delkart ligger til grunn for oversikten som er utarbeidet ved hjelp av Excel. Figuren viser høyden på overkant ledning mot lengde av ledningen. Lengden er målt med start i Ilsvika påslippstunnel. Noe uoverensstemmelse er funnet mellom lengder målt ut fra profilnummerering og lengder ut fra angitte kartkoordinater. Dette har ingen praktisk betydning i denne sammenheng. En legger merke til at ledningen ligger på nivå mellom 1,8 meter og 4,7 meter igjennom Midtbyen før den klatrer opp til ca. 13,5 meter ved utløpet i Ilsvika påslippstunnel.

Lavbrekkene i ledningen ser store ut på grunn av skalaen, men er i realiteten moderate. Likevel kan de representere en utfordring i forbindelse med selvrensing og ansamling av luft.



Figur 3 Oversikt over hovedtrykkledningen i profil. Koter etter nytt Trondheimssystem. Ledningen vist ved rød linje ut fra koordinater fra detaljert kartgrunnlag. Pumpestasjonene er vist ved svarte firkanter mens terrengnivå er vist ved grønn stiplet linje.

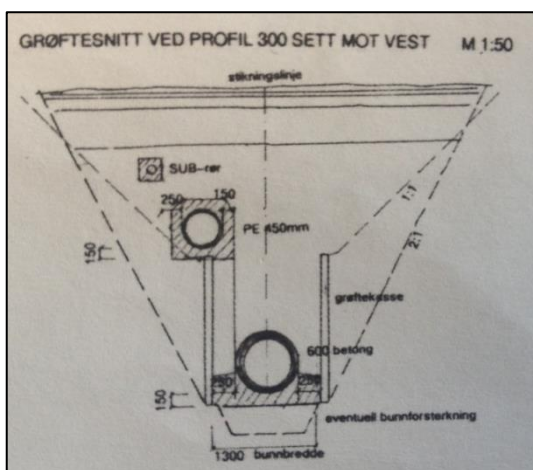
Trykkledningen består av polyetylen (PE) og polyvinylklorid (PVC) (Trondheim kommune, 1996), med trykklasser PN6 og PN10, som står for maks trykk 10 bar (1MPa) og 6 bar (0,6 MPa). I stasjonene er pumpeledningen av stål eller støpejern. Detaljer fra overgang mellom stål/støpejern og PVC/PE er ikke kjent for forfatteren og ikke tatt med i vurdering av singularøstap.

Tabell 1 Informasjon om seksjonene i hovedtrykkledningen, ut fra opplysninger i arkiv og lengder beregnet ut fra detaljerte kart (Trondheim Kommune, 1995).

Strekning	Lengde [m]	Diameter [mm]	Materiale
Ilsvikøra - Ilsvika tunnel	770	500	PE50 PN6
Lillegata - Ilsvikøra	880	450	PE50 PN6
Frostakaia - Lillegata	663	400	PE50 PN6
Brattørbrua - Frostakaia	764	315	PVC PN10

Like ved Ilsvikøra pumpestasjon i seksjonen Lillegata pumpestasjon – Ilsvikøra pumpestasjon går trykkledningen i et større stålrør under blant annet en jernbanekryssing som inneholder el-kabler, sub-rør og trykkledningen. I samme ledningsseksjon, like ved Lillegata pumpestasjon er ledningen også lagt i stålrør ved kryssing av jernbanespor.

Ledningen er gravd ned langs hele traséen. Figur 4 viser et typisk grøftesnitt.



Figur 4 Grøftesnitt fra seksjon Lillegata - Ilsvikøra. Trykkledningen ligger øverst til venstre i grøfta, mens en selvfallsledning som går til nærmeste pumpestasjonen ligger i bunn (Trondheim Kommune, 1995).

Langs store deler av traséen for pumpeledningen går det kortere, avskjærende selvfallsledninger som samler opp avløpsvannet fra en rekke små og gamle selvfallsledninger. De avskjærende selvfallsledningene har stor diameter, se Figur 4.

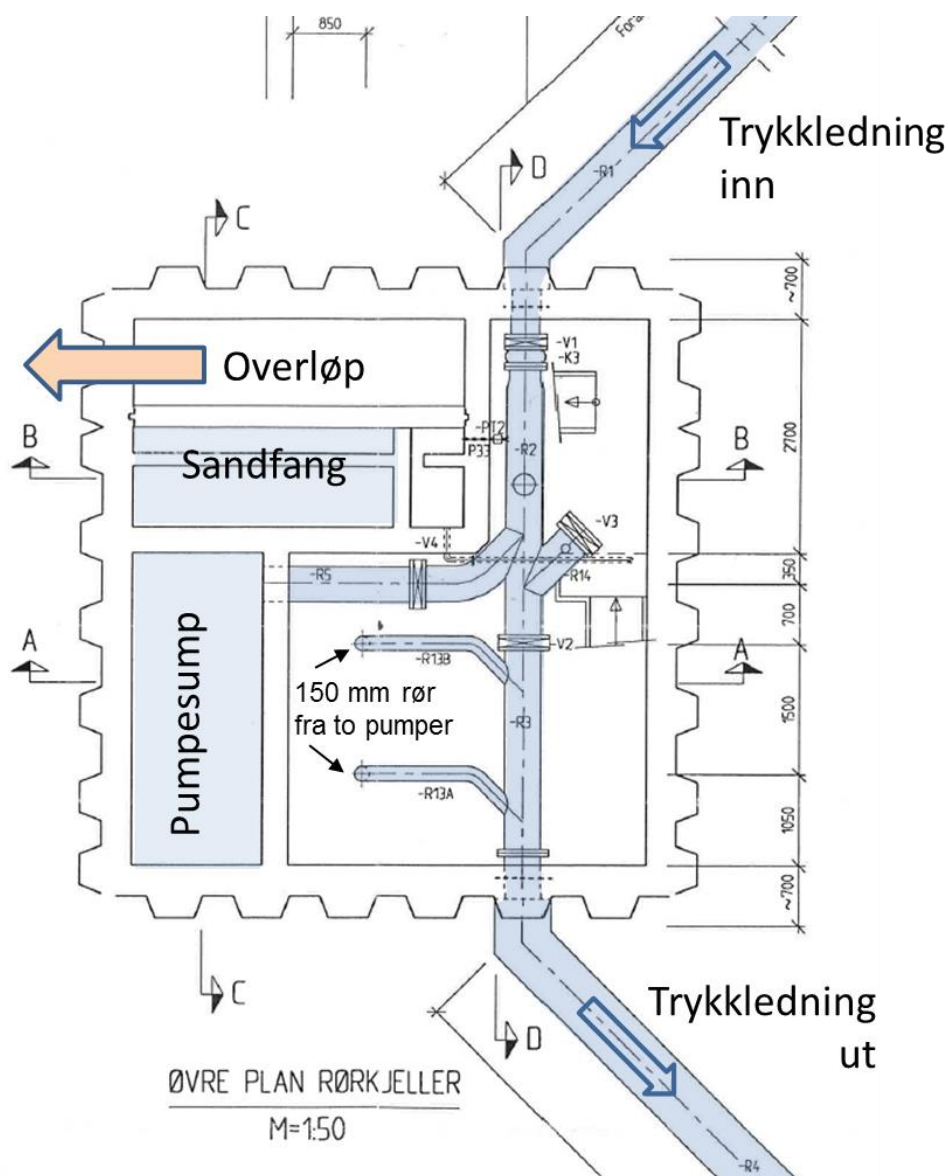
2.3 Pumpestasjonene

De fire pumpestasjonene, (Brattørbrua, Frostakaia, Lillegata og Ilsvikøra), er bygget i perioden 1994 til 1996, og er utformet etter samme hovedprinsipp. Avløpsvann kommer inn til et sandfang og går derfra videre til en pumpeump. To tørroppstilte pumper sender vann inn på trykkledningen. Pumpene startes når vannet i pumpeumpen når bestemte nivå og stoppes når nivået er lavt. Trykkledningen er i stål eller støpejern gjennom pumpestasjonene.

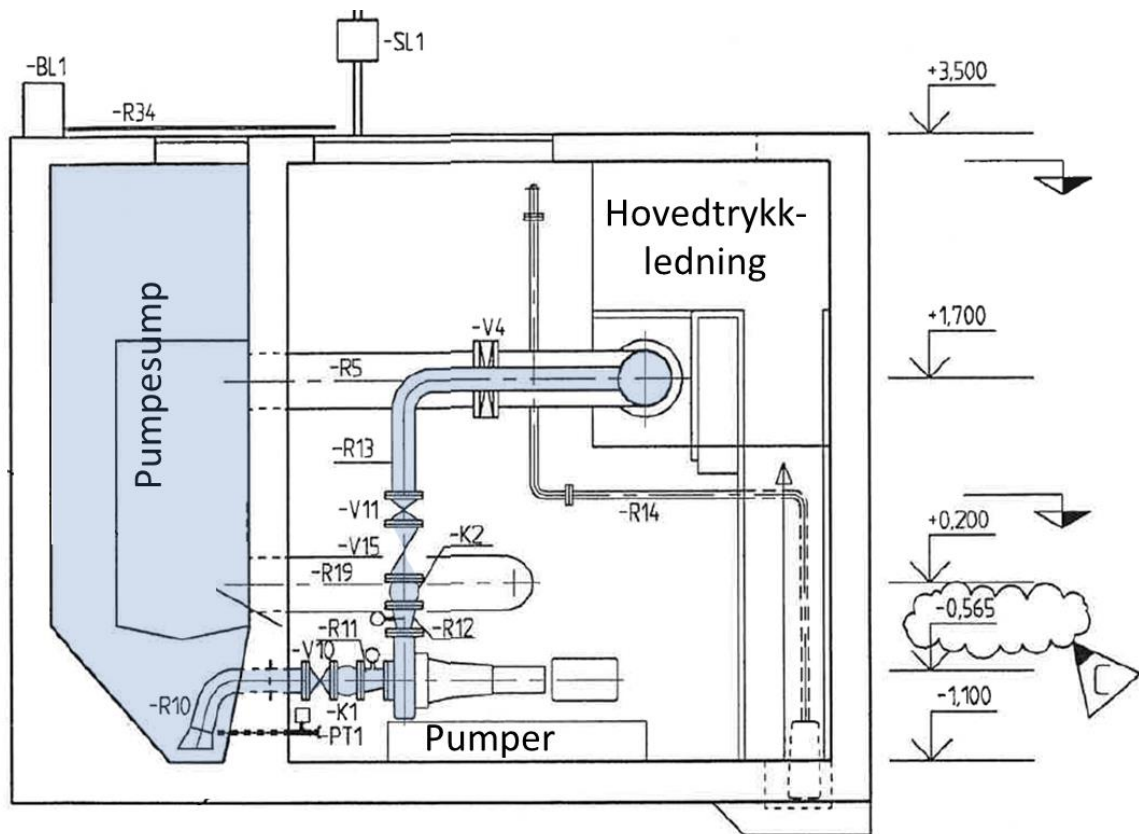
På grunn av stor likhet mellom stasjonene er det i det følgende valgt å presentere kun Frostakaia i plan og profil. Pumpestasjonen har tre etasjer; Toppen: (1) Plan dekke, (2) Øvre plan rørkjeller, (3) Bunnplan rørkjeller.

Figur 5 viser øvre plan rørkjeller. Figuren viser hvordan trykkledningen går gjennom stasjonen og får tilførsel fra to pumpeledninger med dimensjon 150 mm. Trykkledningens dimensjon øker fra 315 mm til 400 mm rett etter innkomst til stasjonen. Figur 6 viser et snitt gjennom pumpesumpen og viser pumpeplassering. Kotene er etter Trondheims gamle, lokale kartsystem. Høydenivå i nytt kartsystem får en ved å legge på 0,89 m. Nivå på pumpeledningen i stasjonen er ut fra dette på 1,7 meter + 0,89 meter \approx 2,6 meter. Høydemålinger i EAdata er gitt i nytt kartsystem. Forskjeller i referansesystem er en utfordring, spesielt siden det ikke alltid fremgår hvilken referanse som er benyttet.

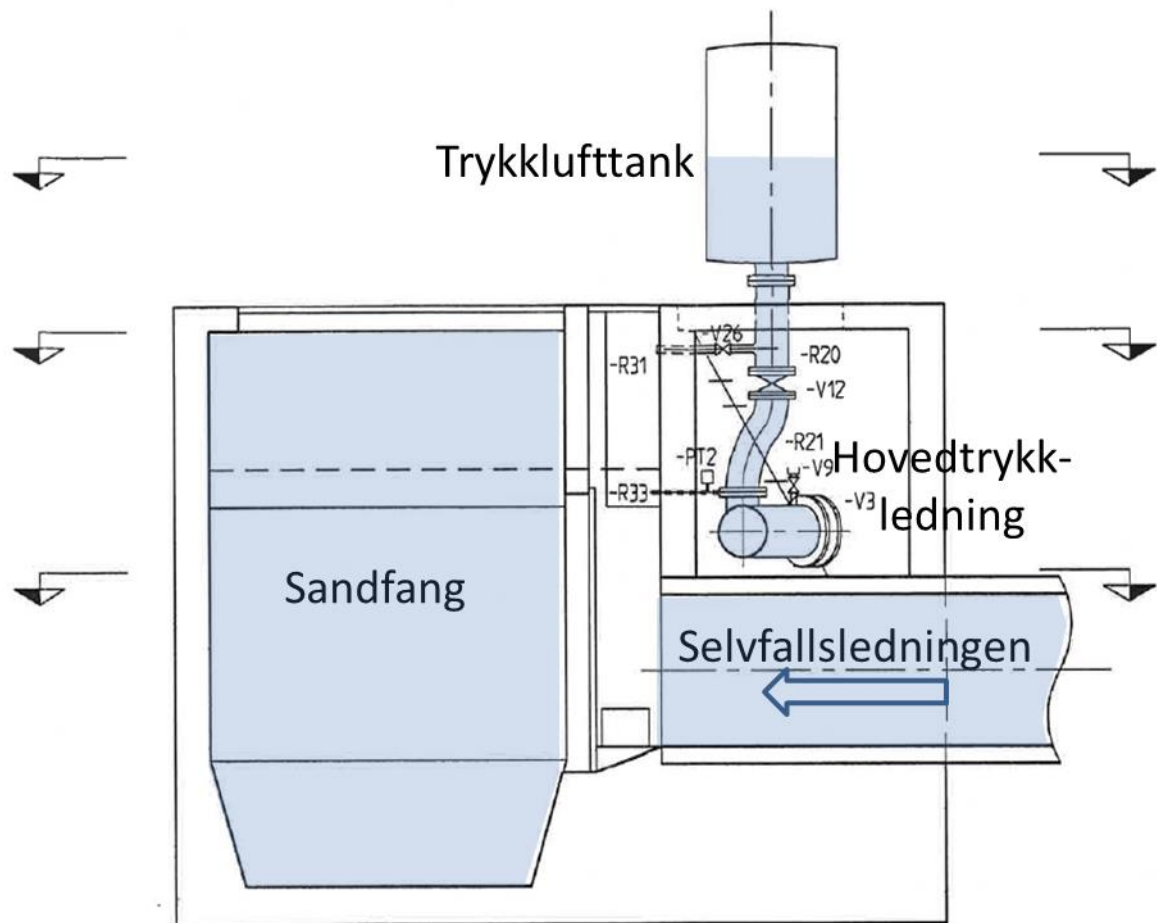
En selvfallsledning med en diameter på ca. 1,2 meter leverer avløpsvann til sandfanget, se Figur 7. Avløpsvannet går over en lav terskel og til pumpesumpen. Pumpesumpen på Frostakaia er på ca. 15 m³ mens sandfanget er på ca. 10 m³. Den lave terskelen mellom sandfanget og pumpesumpen innebærer at de totalt utgjør et lagringsvolum på ca. 25 m³. Bunnen av selvfallsledningen kommer inn på gammelt nivå ca. 0 meter. Dermed bidrar selvfallsledningen ytterligere til lagringsvolumet. Alle stasjonene er laget med overløp til sjøen. Vann går i overløp når pumpene ikke klarer å ta unna og vannet stiger over en overløpsterskel. Overløpsterskelene ligger på kote +2,3 meter i gammelt system som blir kote +3,2 meter i nytt system. Overløpsterskelene ligger på samme nivå på alle stasjonene (Asplan Viak, 2006).



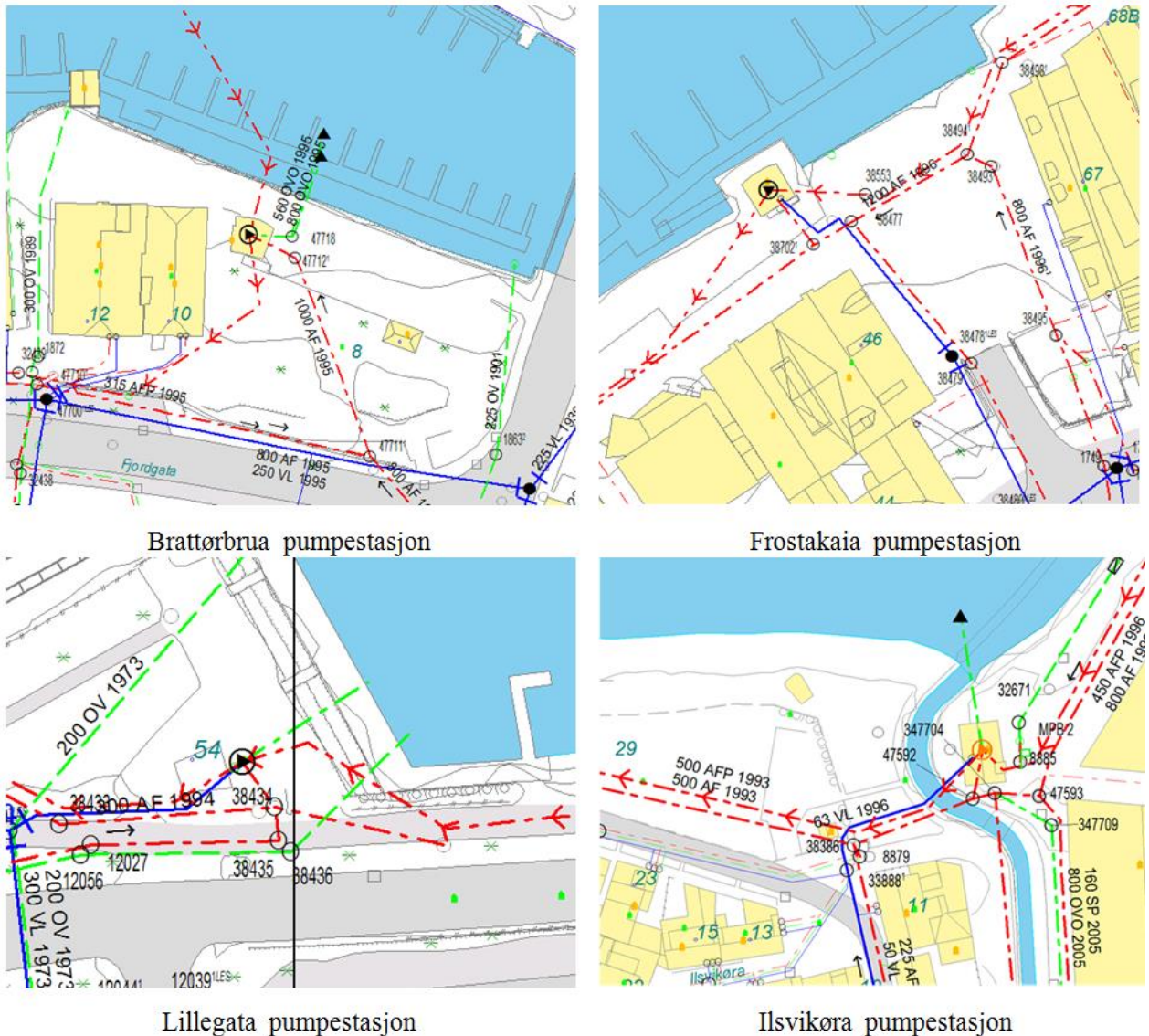
Figur 5 Frostakaia pumpestasjon plan på nivå med trykkledningen, øvre plan rørkjeller (Trondheim Kommune, 1995). Forklaring og farge er lagt til plantegningen.



Figur 6 Frostakaia pumpestasjon Snitt A-A, med pumpesump og pumpeplassering (Trondheim Kommune, 1995). Toppetasjen på bakkenivå er ikke vist. Koter gitt i gammelt lokalt Trondheims-system. Legg til 0,89 meter for å få nye koteverdier. Forklaringer og farge er lagt til snittet.



Figur 7 Frostakaia pumpestasjon Snitt B-B, med selvfallsledning, sandfang og trykkluftstank på trykkledningen (Trondheim Kommune, 1995). Forklaringer og farge er lagt til snittet.



Figur 8 Beliggenhet av pumpestasjonene med tilkoblede ledninger (Gemini, 2015)

Figur 8 viser beliggenheten av pumpestasjonene i detalj samt tilkoblede ledninger. Pumpeledningen vises i rødt med piler. Selvfallsledninger vises i rødt uten piler. De blå ledningene er drikkevannsledninger.

Sandfang og pumpebasseng fungerer som utjevningsbasseng i mellom innkommende vannmengde og vannmengden som pumpes ut. Pumpekapasiteten er dimensjonert ut fra maksimal inngående vannmengde og driftsmessige forhold. Pumpene går kun deler av tiden styrt av vannivået i pumpebasseng. Dimensjonering baseres normalt på pumpefabrikantenes spesifikasjoner om optimal pumpe drift. Ifølge (John Zoeller, 2013) bør pumpen eksempelvis gå fra 5 til 30 minutter hver gang og det legges gjerne opp til at det pumpes ca. $\frac{1}{4}$ av tiden mens sumpen fylles uten pumping $\frac{3}{4}$ av tiden. Thorolfsson (Ødegaard, et al., 2012) peker på at om pumpekapasiteten er dobbelt så stor som tilførselen vil pumpefrekvensen (antall start pr tidsenhet) bli størst, noe som gir høy belastning på pumpa. Normalt velges større pumpekapasitet. Pumpeprodusenter antyder at det ikke bør legges opp til flere enn 10 -15 start stopp syklene pr. time. Pumpebassengens størrelse er i henhold til dette dimensjonert ut fra ønskede start/stopp frekvenser og vannmengder.

2.4 Pumper

I hver av stasjonene er det montert to pumper hvor både pumpe og motor er tørroppstilte, se Figur 9 og Tabell 2. Pumpene i de fire pumpestasjonene er alle sentrifugalpumper, men type pumpe og impeller/pumpehjul varierer.

Tabell 2 Oversikt over type pumpe og tilbakeslagsventiler

Pumpestasjon	Pumpetype	Rørdiameter fra pumpe [mm]	Maks effekt [kW]	Tilbakeslagsventiler
Brattørbrua	Flygt 3202.180	150	44	Socla 408, 150 mm
Frostakaia	ABS/Sulzer FB 100/100-32	150	37	Socla 408, 150 mm
Lillegata	ABS/ Sulzer FB 100/100-32	125	37	Socla 408, 125 mm
Ilsvikøra	ABS/Sulzer FB 80/80-26	125	11	Socla 408, 125 mm

Pumpetyperne på Frostakaia, Lillegata og i Ilsvikøra går nå under navnet Sulzer FB 100/100- 32 og Sulzer FB 80/80- 26 som et resultat av at Sulzer kjøpte ABS høsten 2011 (VAnytt, 2014).

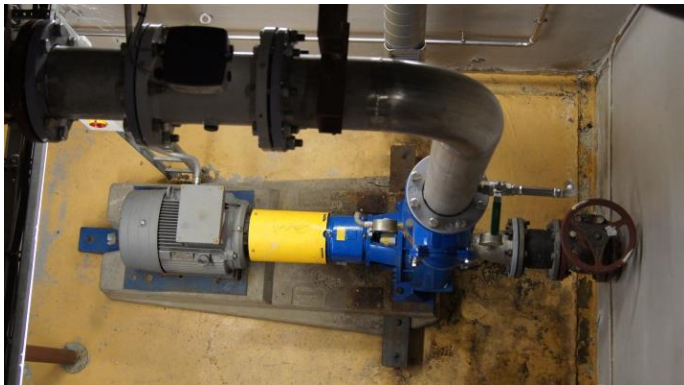
Pumpene på pumpestasjonene Frostakaia, Lillegata og i Ilsvikøra har en horisontal oppstilling som vist i Figur 9(a). ABS pumpene har impeller av typen virvelhjul, (ABS Cardo group, 2012), også kjent som fristrømshjul. Virvelhjul er et åpent flerbladete pumpehjul, hvor vannet i stor grad passerer pumpehuset uten å være i kontakt med selve pumpehjulet. Pumper med virvelhjul er ømfintlig for langfibrede gjenstander som kan tvinne seg opp inne i pumpehuset og dermed ødelegge virveldannelsen (Ødegaard, et al., 2012).

På Frostakaia har de to pumpeledningene som går fra hver sin pumpe og inn på den felles pumpeledningen en diameter på 150 mm. I Lillegata og på Ilsvikøra har de to pumpeledningene som går fra hver sin pumpe og inn på den felles pumpeledningen en diameter på 125 mm.

Ved å kontakte Torsten Olsen hos Owre Johnsen AS ble det framskaffet nøyaktige pumpekarakteristikker vist i Figur 10 og i Figur 11.

På Brattørbrua har pumpene en vertikal oppstilling, Figur 9 (b). Brattørbrua pumpestasjon er den eneste stasjonen som har byttet pumper. De nye ble montert i desember 2013. Impelleren er et kanalhjul av typen N-hjul med en utforming som skal sørge for å gi en effektiv selvrensing (Xylem, Flygt , 2012). Erfaringen med hensyn til selvrensing etter installasjon i 2013 er god (Mellemsæther, 2015).

På Brattørbrua har de to pumpeledningene som går fra hver sin pumpe og inn på den felles pumpeledningen en diameter på 150 mm. Det er gjennomført pumpetest for Flygt 3202 på fabrikken i Linås i Sverige den 12.12.2013, og den resulterende pumpekarakteristikken er vist i Figur 12.

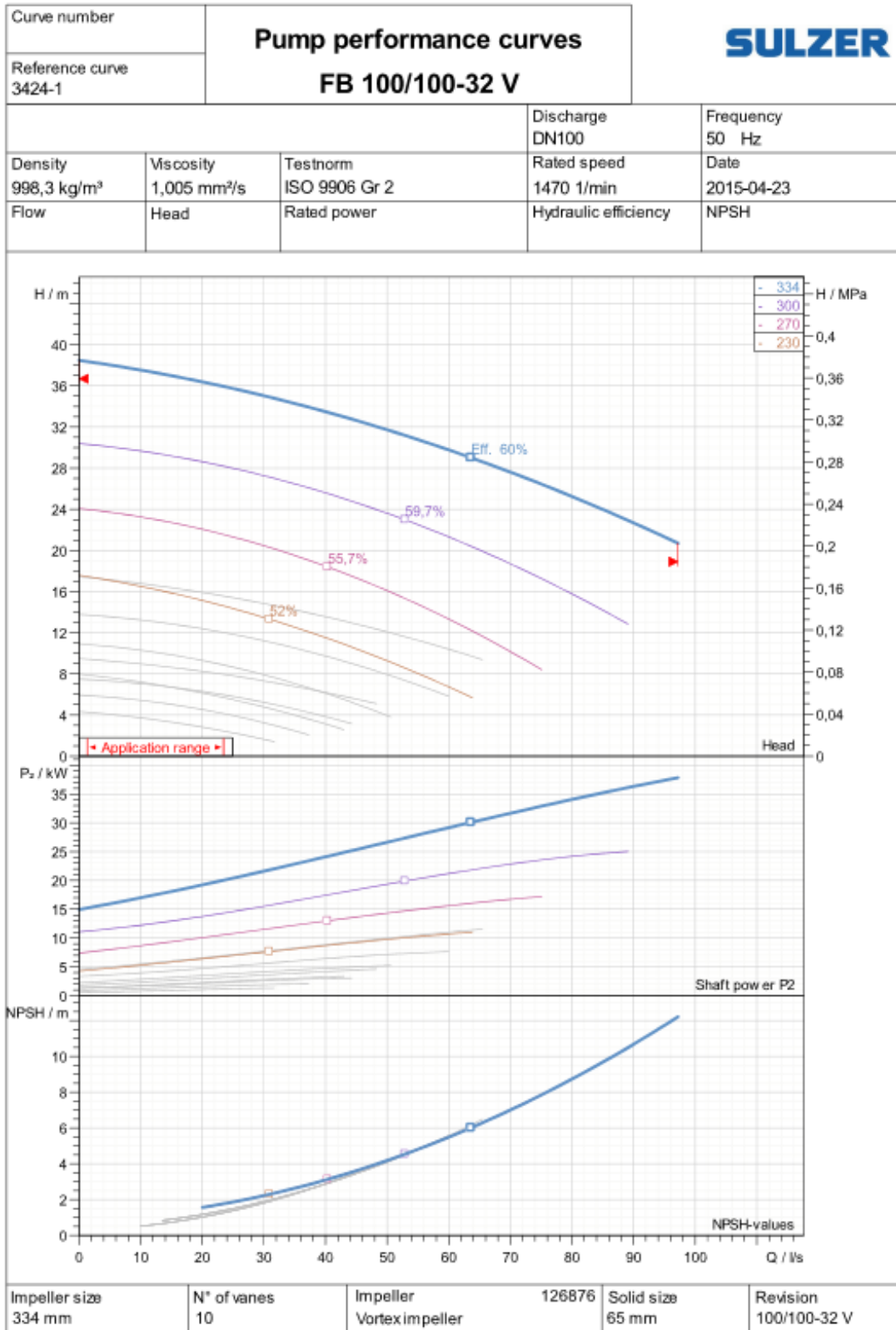


(a) ABS/Sulzer FB 100/100-32, Frostakaia pumpestasjon



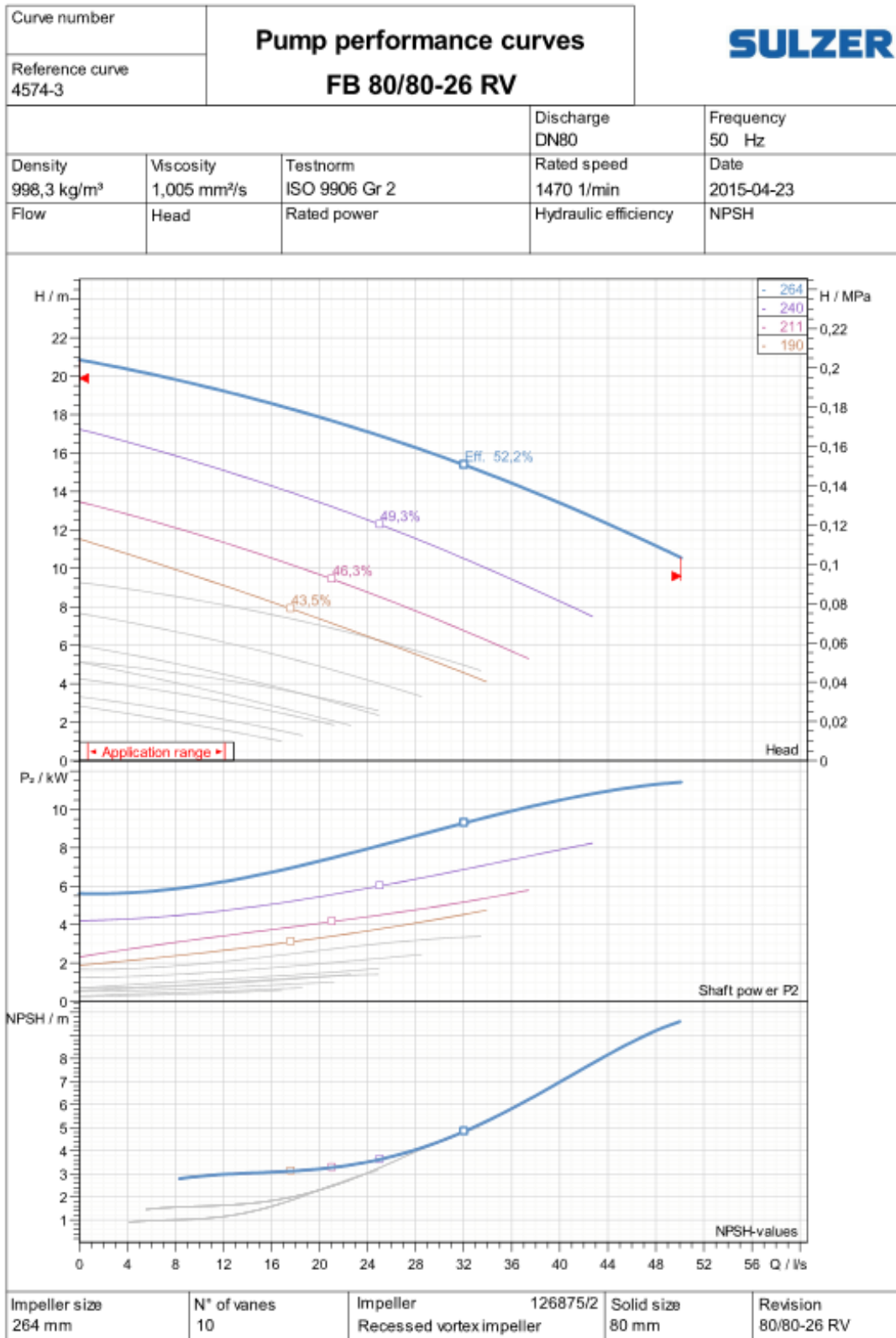
(b) Flygt 3202.180, Brattørbrua pumpestasjon

Figur 9 To av pumpene som er installert i anlegget (Foto VN)



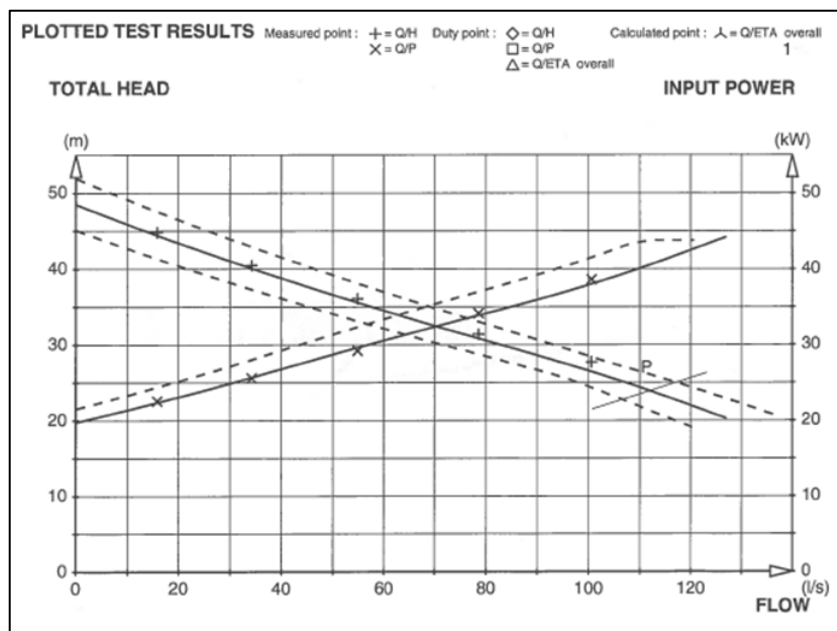
Sulzer reserves the right to change any data and dimensions without prior notice and can not be held responsible for the use of information contained in this software. Spax® 4, Version 4.0.18 - 2013/04/30 (Build 225)
Data version July-2013

Figur 10 Pumpekaraktistikk Sulzer (ABS) FB 100/100-32 V (Olsen, 2015)



Sulzer reserves the right to change any data and dimensions without prior notice and can not be held responsible for the use of information contained in this software. Spaix® 4, Version 4.0.18 - 2013/04/30 (Build 225)
Data version July-2013

Figur 11 Pumpekaraktistikk Sulzer (ABS) FB 80/80-26 RV (Olsen, 2015)



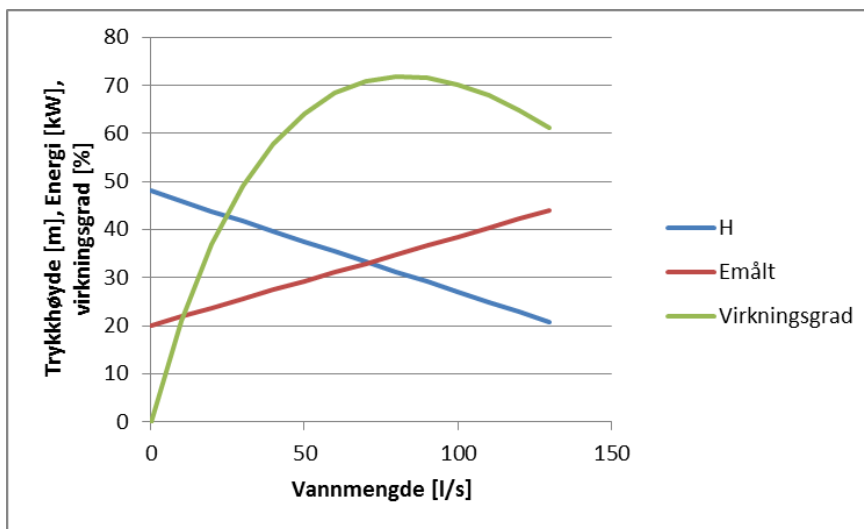
Figur 12 Pumpekaraktistikk for Flygt 3202.180 (Mellemsæther, 2015). Pumpekaraktistikken er den nedadgående grafen mens den oppadgående er energiforbruk.

Pumpetesten i Figur 12 viser energiforbruket til pumpetypen Flygt 3202 på Brattørbrua pumpestasjon. For 50 l/s har en løftehøyde på 37 meter mens pumpen forbruker 28 kW. Teoretisk energiforbruk ved 50 l/s og en løftehøyde på 37 m er 18,5 kW:

$$E = m \cdot g \cdot h = 50 \frac{kg}{s} \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 37m = 18500 kg \frac{m}{s^2} \cdot \frac{m}{s} = 18,5 kW \quad \text{Lign. 1}$$

Dette gir en virkningsgrad på $\eta = 18,5/28 = 66\%$. En beregning for andre vannmengder og løftehøyder er gjennomført i Excel og resultatet er vist i Figur 13. Dette viser høy virkningsgrad (over 70 %) for vannmengder i mellom 60 – 100 l/s.

Når en pumpe går alene på Brattørbrua er det i EAdata registrert vannmengde på ca. 85 l/s over en periode på 10 minutter for hver gang pumpen kjøres. Pumpene på Brattørbrua er relativt nye og EAdata viser god drift med høy virkningsgrad.



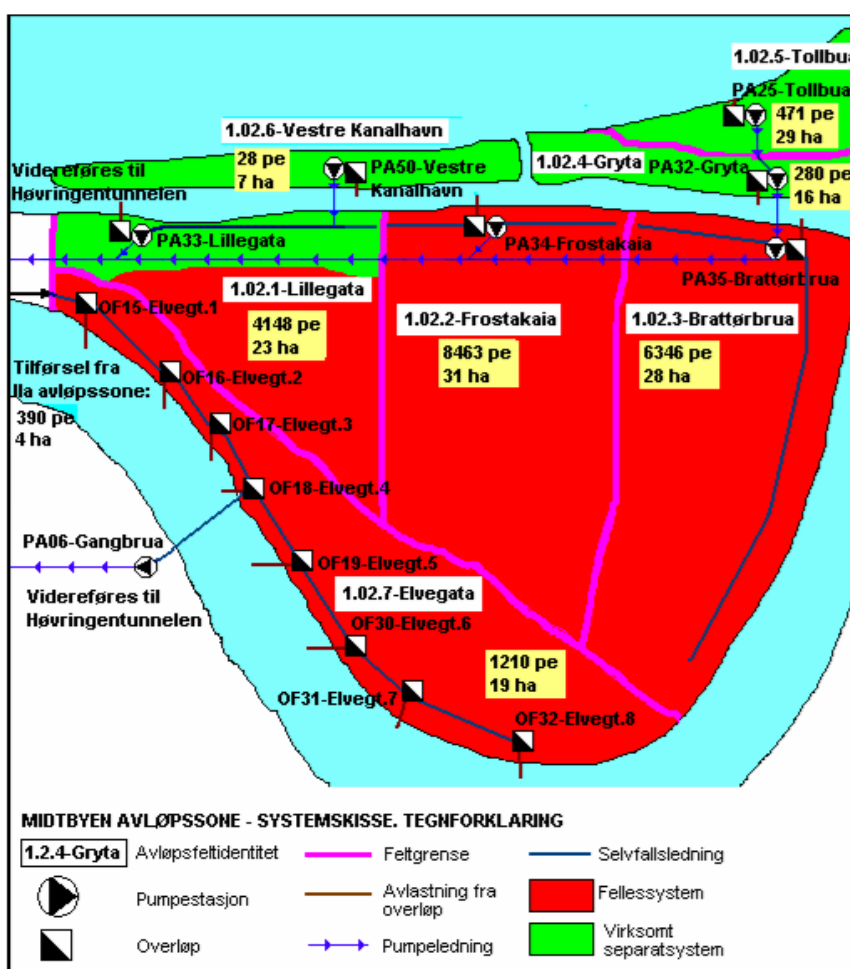
Figur 13 Beregnet virkningsgrad for Flygt pumpe på Brattørbrua pumpestasjon basert på pumpetest

2.5 Dekningsområde og vannmengder

Trondheim sentrum domineres av fellesledninger for spillvann og overvann. Dette er typisk for eldre bebyggelse. Trykkavløpssystemet i Midtbyen i Trondheim er dimensjonert ut i fra forventede mengder spillvann og overvann. Fellesledning gir stor belastning på ledningssystemer og pumpestasjoner, og det er ikke lagt opp til å ta unna alt overvannet ved ekstrem nedbør. Avløpsvann som overskrider kapasiteten til pumpeanlegget går i overløp til sjøen.

2.5.1 Avløpsfelt knyttet til anlegget

Midtbyen er delt opp i ulike avløpsfelt som vist i Figur 14 (Asplan Viak, 2006). De angitte tall på personekvivalenter i figuren har økt moderat i forhold til Tabell 3 som viser tall fra 1996. Figuren viser hvilke områder som har fellessystem og hvilke som har virksomt separatsystem. Utredningen, Saneringsplan avløpsone 1,02 (Asplan Viak, 2006), dekker ikke avløpsfeltet for Iilsvikøra pumpestasjon.



Figur 14 Inndeling i avløpsfelt, Midtbyen avløpsone (Asplan Viak, 2006)

Avløpsfelt 1.02.1 Lillegata har avrenning mot Kanalen og sonen har relativt store deler separate overvannsledninger til å være i Midtbyen. Separate overvannsledninger er lagt i Sandgata, Kongens gate og ved Leutenhaven. Det er kun overvannsledningene i Sandgata som har utslipp til resipient, mens separatsystemet i Kongens gate og Leutenhaven i dag er knyttet til fellessystemet og ledes til Lillegata pumpestasjon, PA33- Lillegata. Avløpsfelt 1.02.6 Vestre Kanalhavn ligger vest for Lillegata avløpsfelt. Nettet er lagt etter 2002 og består av virksomt separatsystem som går til sjøen. Spillvannet i feltet har avrenning til Vestre Kanalhavn pumpestasjon som pumper avløpsvannet til pumpesumpen i Lillegata pumpestasjon (Asplan Viak, 2006).

Avløpsfelt 1.02.2 Frostakaia består hovedsakelig av et fellessystem, men det er lagt enkelte separate

overvannsledninger. Den lengste overvannsledningen ligger i Nordre gate og går fra Kongens gate til Thomas Angells gate. Separatledningene er imidlertid uvirksomme i det de er koblet til fellessystemet. Noen få separatledninger like ved Kanalen er likevel ikke koblet til fellessystemet, (Asplan Viak, 2006).

Avløpsfelt 1.02.3 Brattørbrua har avrenning mot kanalen langs Nidelva i øst og mot Kanalen på nordsiden. Nettet i sonen er et fellessystem, unntatt noen overvannsledninger i Kjøpmannsgata som har utslipp til Nidelva. Avløpet går inn på avskjærende selvfallsledninger langs Nidelva som leder avløpet til Brattørbrua pumpestasjon, PA35- Brattørbrua. Spillvannet fra avløpsfelt 1.02.5 Tollbua pumpes i en trykkledning fram til pumpeumpen i Gryta pumpestasjon, PA36- Gryta. Spillvannet fra avløpsfelt 1.02.4 Gryta samles til Gryta pumpestasjon ved selvfallsledninger. Gryta pumpestasjon pumper avløpet over kanalen til pumpeumpen til Brattørbrua pumpestasjon (PA35) etter prinsippet pumping fra stasjon til stasjon. Både Gryta og Tollbua avløpsfelt har nett med virksomt separatsystem hvor overvannet går til sjøen (Asplan Viak, 2006).

2.5.2 Mengdevurdering av spillvann

Beregning av dimensjonerende mengde spillvann er basert på antall personekvivalenter innen området. Antall personekvivalenter beregnes ut fra antall fastboende, sengeplasser i hoteller, omfang av restauranter, industri og annen relevant aktivitet. Det finnes ulike erfaringstall for spillvannsutslipp per personekvivalent per døgn. Den engelske versjonen av den europeiske standarden for drenering og avløpssystem utenfor bygninger, BS EN 752:2008 angir 150 - 200 l/person/døgn. Ved dimensjonering av anlegget tok Trondheim kommune trolig utgangspunkt i antatt spillvannsmengde 150 l/døgn (Asplan Viak, 2006). Nyere plandokumenter fra Trondheim Kommune legger opp til 200 l/døgn. Mengden spillvann vil variere gjennom døgnet. Tabell 3 viser antall personekvivalenter (PE) i sonene som er koblet til de fire pumpestasjonene. Sum personekvivalenter fra 1996 er på 20399 mens total pumpekapasitet summeres til 188 l/s. Målinger av vannmengder under drift (EAdata) bekrefter maksimal kapasitet i størrelsesorden 188 l/s.

Tabell 3 Antall personer, personekvivalenter og mengde vann for dimensjonering av pumper og ledninger for det avskjærende avløpssystemet i Midtbyen (Trondheim kommune, 1996)

Pumpestasjon	Bosatte personer	Bosatte PE (1)	Annet PE (2)	SUM PE	Pumpekapasitet [l/s]
Brattørbrua	339	271	5935	6206	70
Frostakaia	468	374	7944	8318	55
Lillegata	1320	1056	2886	3942	35
Ilsvikøra	1363	1090	843	1933	28
SUM	3490	2791	17608	20399	188

Et lite regnestykke for spillvann er interessant selv om forutsetningene er grove og til dels tvilsomme:

En PE tilsvarende 200 l/døgn er på ingen måte jevnt fordelt over døgnet, men tilsvarer $200 \text{ liter} / (24 \cdot 60 \cdot 60) \text{ sek} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$. For SUM PE = **20399** gir dette en spillvannsmengde på $20399 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ l/s} = 47 \text{ liter} / \text{sek}$. De resterende 141 l/s er tilgjengelig for overvann, (**141 l/s + 47 l/s = 188 l/s**). På bakgrunn av dette kan det antydes at $47/188 = 25 \%$ av kapasiteten trengs for gjennomsnittlig spillvannsmengde. Spillvannsmengden varierer igjennom døgnet og vil om morgenen og sen ettermiddag kreve større andel av kapasiteten.

2.5.3 Mengdevurdering av overvann

Dimensjonering for overvann innebærer urbanhydrologiske vurderinger. Viktige faktorer er mengde nedbør, tilhørende areal som drenerer til ledningssystemet, avrenningsforhold og konsentrasjonstid. Konsentrasjonstid inngår i beregning av tid vannet bruker på å renne på overflaten til drenskummer og gjennom ledningssystemet til en pumpestasjon. Trondheim kommune har i sin VA- norm, vedlegg 5 (Trondheim kommune, 2012), angitt prinsipper for beregning av overvannsmengde for dimensjonering av ledning og fordrøyningsvolum.

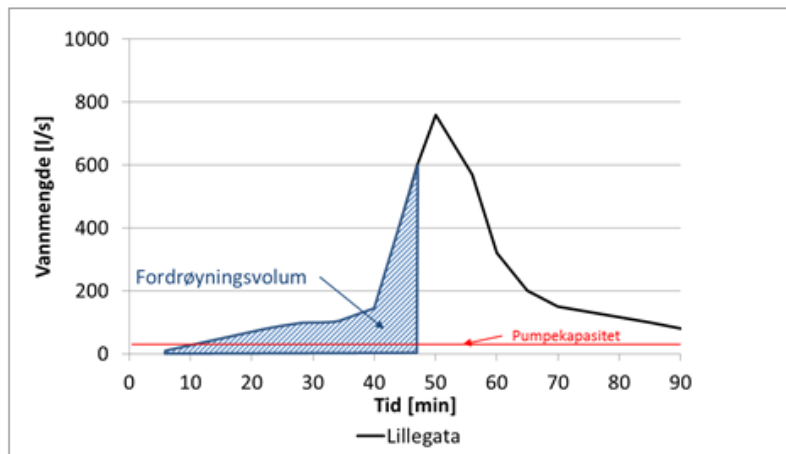
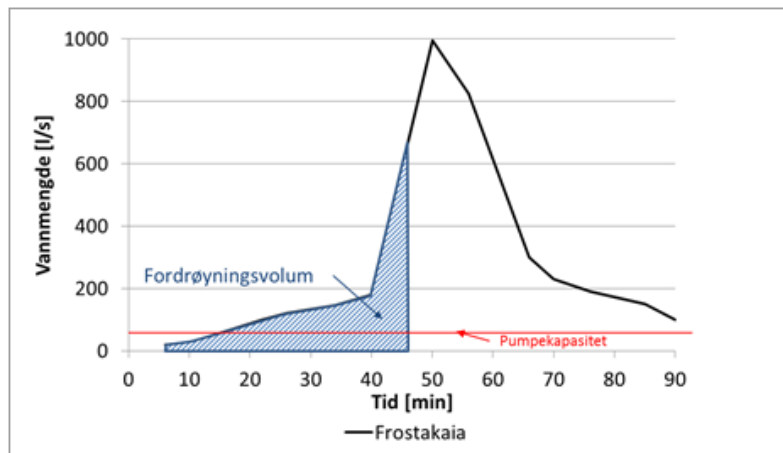
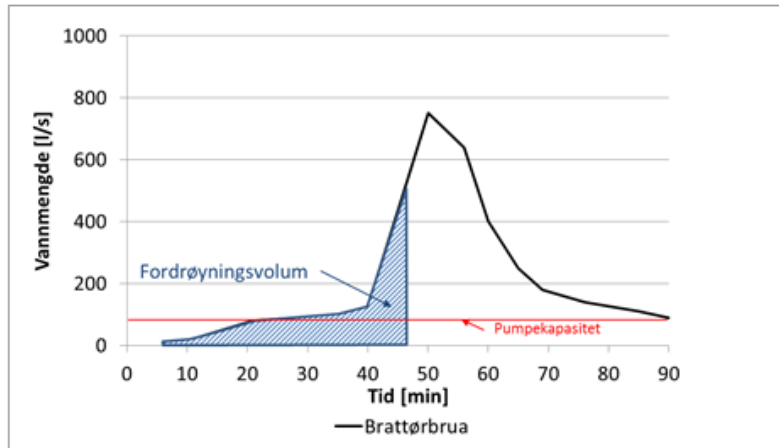
Et lite, enkelt regnestykke basert på tallene i Tabell 3, kan illustrere kapasitet for overvann: Areal som drenerer til systemet er svært grovt anslått til i størrelsesorden $1000\ 000\ \text{m}^2$. En antydning på hva **141** l/s innebærer kan en få ut fra: $141\ (\text{liter /sek}) / 1000000\text{m}^2 = 0,141(\text{m}^3/\text{s})/1000000\text{m}^2 = 1,4 \cdot 10^{-7}\text{m}/\text{sek} = 0,5\ \text{mm}/\text{time}$. Dette overslaget innebærer at en antar jevn nedbørs-intensitet over en time, og at denne går inn i ledningsnettets uten fordrøying. Forutsetningen er ikke realistisk, men tallet illustrerer likevel at systemet ikke kan ta imot overvann fra hele dette arealet ved intens nedbør. Det er lagt opp til at ved ekstremnedbør går mye avløpsvann i overløp til kanalen og sjøen.

I sin rapport *Saneringsplan avløp avløpszone 1.02 Midtbyen henviser Asplan Viak*, (Asplan Viak, 2006), til ”Arbeidsnotat; Vurdering av avskjærende system og pumpestasjon i Midtbyen, Rev.03, Reinertsen 1994” der det er presentert hydrogram for 10 års regn for de tre pumpestasjonene Brattørbrua, Frostakaia og Lillegata. Resultatene er gjengitt i Tabell 4 og Figur 15. Det fremgår at nedbøren varer ca. 90 minutter der maksimal tilrenning til stasjonene opptrer etter ca. 50 minutter. De maksimale verdiene er på henholdsvis 750 l/s, 990 l/s og 760 l/s til pumpestasjonene på Brattørbrua, Frostakaia og Lillegata. I sum blir dette en belastning på 2500 l/s som langt overstiger anleggets kapasitet på ca. 190 l/s.

Et viktig element i vurderingene av mengde overvann til stasjonene er effekten av fordrøying ved oppmagasinering av vann i selvføllsledningene. Den avskjærende selvføllsledningen langs Kjøpmannsgata og Kanalen ligger på deler av strekningen under overløpstersklene i pumpestasjonene. Ledningene ligger lavt og har stor diameter og fungerer som fordrøyningsmagasin. Tabell 4 (Asplan Viak, 2006) viser et tilgjengelig fordrøyningsvolum inn mot de tre pumpestasjonene på $170\ \text{m}^3 + 220\ \text{m}^3 + 210\ \text{m}^3 = 600\ \text{m}^3$. Beregningene er utført i Nivanett. Figur 15 viser at det tar ca. 45 minutter etter at det begynner å regne før fordrøyningsvolumet er fylt opp og vann går til overløp.

Tabell 4 Resultater fra beregninger knyttet til Hydrogram, Figur 15 (Asplan Viak, 2006)

Strekning	Fordrøyningsvolum [m ³]	Tilrenning når overløp trer i funksj. ved 10 – årsregn [m ³]	Maks tilrenning ved 10 – årsregn [m ³]
Mot Brattørbrua pumpestasjon	170	500	750
Mot Frostakaia pumpestasjon	220	650	990
Mot Lillegata pumpestasjon	210	600	760



Figur 15 Hydrogram av 10 års regn som viser fordrøyningsvolumet inn til tre pumpestasjoner. Beregningene er gjort i Nivanett av Reinertsen (Asplan Viak, 2006).

2.5.4 Utslipp igjennom overløp

Betraktningene i Figur 15 viser at overvann kan representere svært store vannmengder og gi stor belastning ved felles ledningssystem for overvann og spillvann. Asplan Viak (Asplan Viak, 2006) rapporterer en totalt målt avløpsmengde til renseanlegget (RA) på 2 428 076 m³ basert på vannmengdemåleren i Ilsvika påslippstunnel. De rapporterer også oppsummert vannmengde til overløp for 2004 fra de fire pumpestasjonene og får i sum: 179 082 + 59 105 + 58 654 + 81 698 = 378 539 m³. Andel til overløp over året er da: $378539/2806614 = 13,5\%$.

Tabell 5 Totale vannmengder og overløp i 2004 (Asplan Viak, 2006)

Avløpsmengder	[m³]
Avløpsmengde til Renseanlegg	2 428 076
Overløpsmengder fra Brattørbrua pumpestasjon	179 082
Overløpsmengder fra Frostakaia pumpestasjon	59 105
Overløpsmengder fra Lillegata pumpestasjon	58 654
Overløpsmengder fra Ilsvikøra pumpestasjon	81 698
Sum avløpsmengder	2 806 614

3 TEORI OG METODE FOR MODELLERING AV SYSTEMET

Dette kapittelet omhandler teori knyttet til beregninger og modellering av systemet.

3.1 Falltap

3.1.1 Friksjonstap i rør

For å modellere trykkledningen må en vurdere falltap i røret. Falltapet fra friksjon, h_f , er i denne oppgaven beregnet ved bruk av Darcy - Weisbachs ligning (Weisbach , 1848):

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} [m] \quad \text{Lign. 2}$$

Hvor:

- f = Friksjonskoeffisienten
- L = Lengden på ledningen [m]
- D = innvendig diameter i ledningen [m]
- v = Vannhastighet i røret [$\frac{m}{s}$]
- g = Gravitasjonskonstanten $9,81 \frac{m}{s^2}$

I hovedtrykkledningen forventes turbulent strømning. For en turbulent strømning er det ikke mulig å beregne friksjonskoeffisienten teoretisk slik som ved laminær strømning. Friksjonskoeffisienten f, fastlegges basert forsøk med variasjoner av Reynoldstallet, tverrsnittets geometri og overflateruheten. Friksjonsfaktoren er i beregningene som er gjennomført, funnet i fra Moodys diagram, se Figur 16 (Moody, 1944).

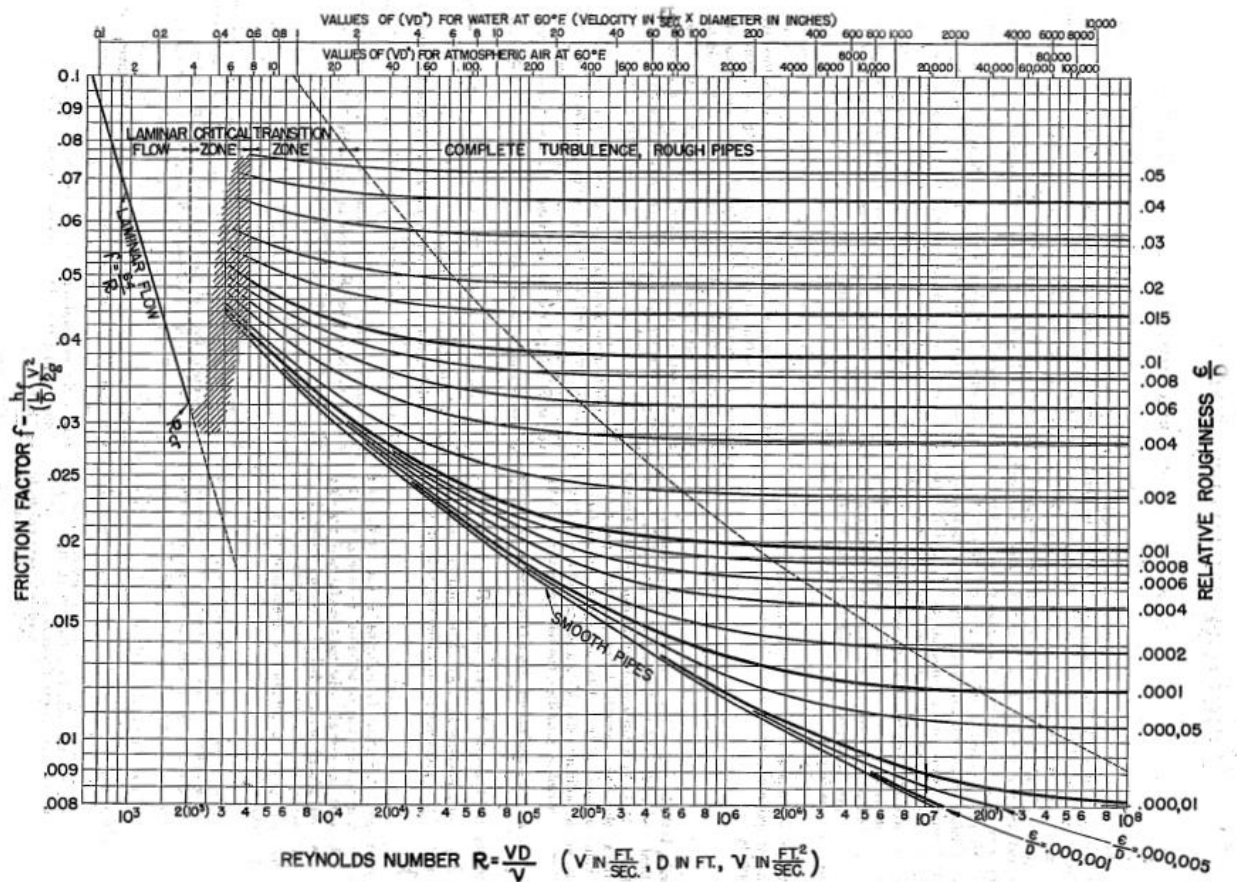
Reynoldstallet er gitt av diameteren, hastigheten, v, og vannets viskositet, ν , ved følgende formel:

$$Re = \frac{D \cdot v}{\nu} \quad \text{Lign. 3}$$

Rørets relative ruhet er definert som rørruheten k_s relativ til diameteren D som k/D . Ruheten k illustrerer diameteren på sandkorn som er «limt fast» på innsiden av røret. Det er tykkelsen på dette laget som styrer friksjonstapet (Butler & Davies, 2011). I Tabell 6 vises erfaringsverdier for ekvivalent sandruhet basert på en mengde forsøk.

Tabell 6 Ruhet for forskjellige materialer (Torben, et al., 2007)

Rørmateriale:	Ruhet, k (ϵ i Figur 16):
PVC og PE, ny	0,01-0,05
PVC og PE med avsetninger	0,15-0,6
Stålrør, galvaniserte	0,1-0,2
Stålrør, galvaniserte med avsetning	0,5-1,0



Figur 16 Moody diagram i original versjon fra 1944 (Moody, 1944)

I dette arbeidet er det utarbeidet en falltapsmodell for stasjonær strømning i hovedtrykkledningen. I denne sammenhengen er det tatt i bruk et ferdig programmert regneark som gir friksjonsfaktoren som funksjon av relativ ruhet og Reynolds tallet (Cimbala, 2012). Regnearket er kontrollert mot Moodys diagram og verifisert før det er benyttet i falltapsmodellen. I falltapsmodellen for stasjonær strømning er ruheten k blitt valgt til en verdi på 0,6 (Torben, et al., 2007). Som vist i Tabell 6 er dette i øvre intervallet for PVC og PE rør og forutsetter noen avsetninger i røret.

3.1.2 Singulærtap i bend

Singulærtap opptrer ved alle tverrsnittsendringer i rørstrømninger. Når flytende væsker slik som vann passerer forandringer i rørdiameter, ventiler og bend vil viskøse effekter forårsake energitap, uttrykt som falltap i mVs , h_f , (Wrowe, et al., 2010), Lign. 4.

$$h_f = K_s \cdot \frac{v^2}{2g} [mVs] \quad \text{Lign. 4}$$

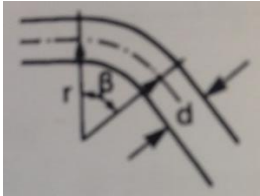
For å beskrive tapet brukes singulærtapskoeffisienten, K_s . Ved en singulærtapskoeffisient på 0 vil det ikke forekomme trykktap, mens ved et singulærtap på 1 vil hele hastighetshøyden gå tapt. Singulærtapskoeffisienten er hovedsakelig funnet ved hjelp av eksperimenter hvor trykktapet blir beregnet ut fra målt hastighet og trykk. Utformingen på bendet vil være avgjørende for verdien til singulærtapskoeffisienten. For bend på 90° vil K normalt variere fra 0,1 kurve til 0,5 ut fra Tabell 7. Verdier for K er også gitt av (Wrowe, et al., 2010). Ledninger bør dimensjoneres slik at singulærtapene er små relativt til friksjonstapet i ledningene. I tiknytning til en pumpestasjon kan antall bend og ventiler føre til betydelig singulærtap, (Ødegaard, et al., 2012).

I falltapsmodellen for stasjonær strømning er singulærtapskoeffisienten til bendene for hver

ledningsseksjon i dette arbeidet addert etter følgende formel: (Torben, et al., 2007).

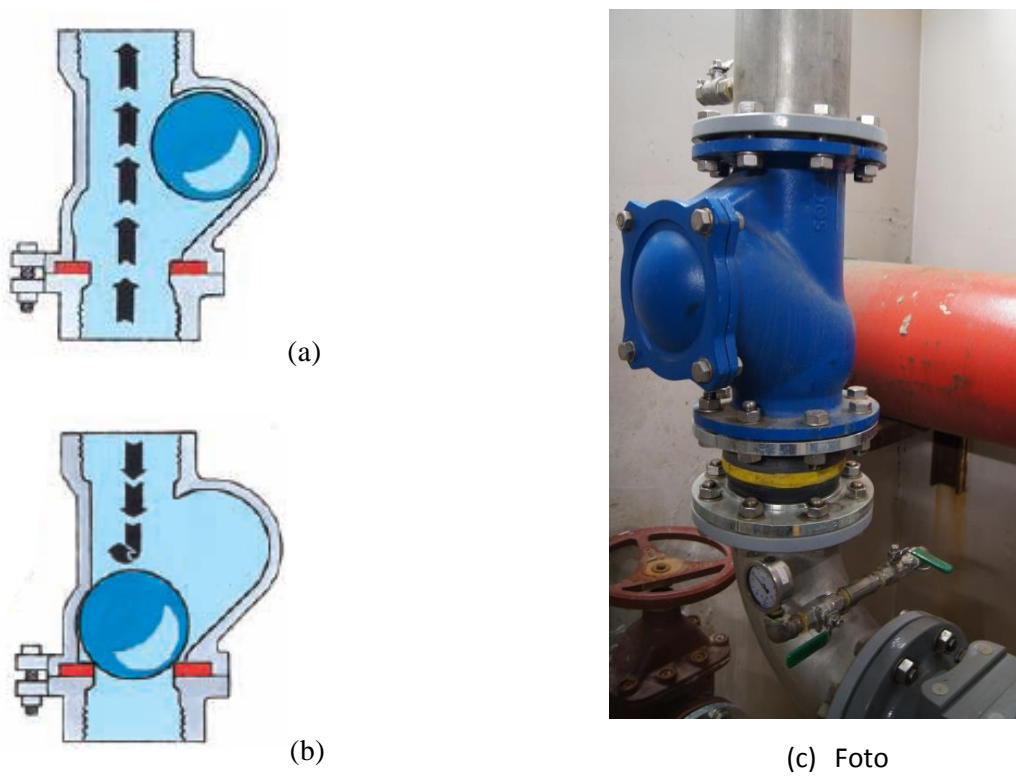
$$K_S = \sum_{\text{Bend } 1}^{\text{bend } n} k_{90} \cdot \sin\theta \quad \text{Lign. 5}$$

Tabell 7 Verdier for ulike singulærkoeffisienter for 90° bend (Torben, et al., 2007)

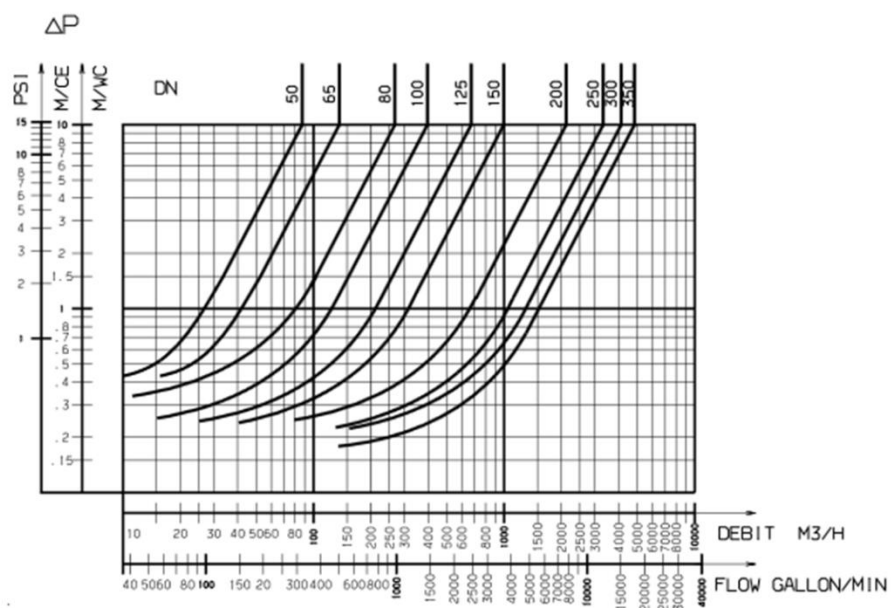
	k_{90}	Ruhet
$r > 4 \cdot d$	0,2	Ru rør
$r > 4 \cdot d$	0,1	Glatte rør
$R = d$	0,5	Ru rør
$R = d$	0,2	Glatte rør

3.1.3 Singulærtap i tilbakeslagsventiler

På de fire pumpestasjonene er det montert tilbakeslagsventiler av typen Socla 408 mellom hver pumpe og hovedtrykkledningen, Figur 17. Tilbakeslagsventiler har til hensikt å hindre tilbakestrømning, baklengsløp av pumpemotor, hindre tømming av ledninger og begrense trykkstøt. På Brattørbrua og Frostakaia pumpestasjoner har tilbakeslagsventilene en dimensjon på 150 mm, ettersom de to pumpeledningene som går fra hver sin pumpe og inn på den felles pumpeledningen har en diameter på 150 mm. På Lillegata og Ilsvikøra pumpestasjoner har tilbakeslagsventilene en dimensjon på 125 mm. , ettersom de to pumpeledningene har en diameter på 125 mm. Falltapsdiagrammet i Figur 18 viser kurver for falltap for Socla 408 med forskjellig diameter. Kurvene viser en nedre grense på tapskurven når vannmengden går mot null, denne nedre grensen er relatert til åpningstrykket.

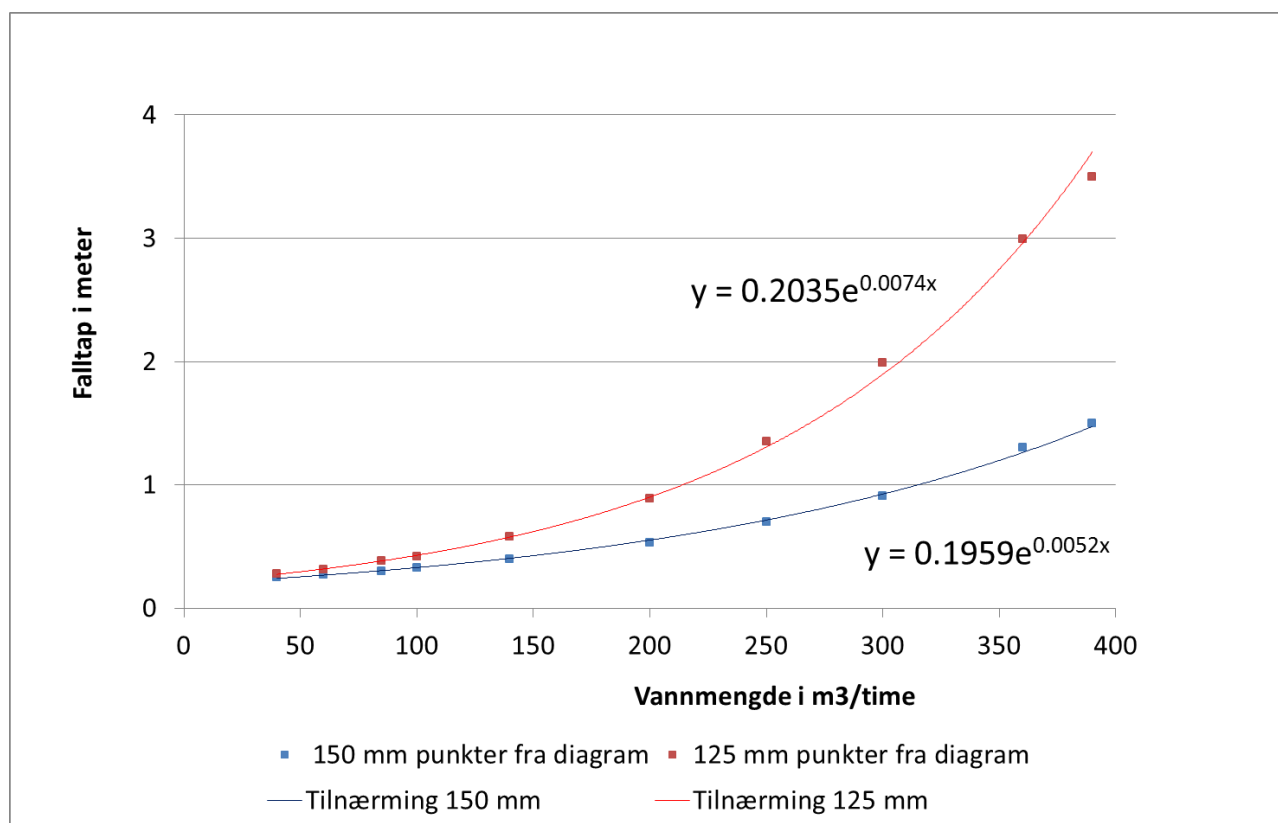


Figur 17 (a) og (b) Prinsippskisse for tilbakeslagsventil med kule og stengning basert på gravitasjon, (Socla, 2012). (c) Tilbakeslagsventil på Brattørbrua pumpestasjon (Foto VN).



Figur 18 Falltapsdiagram for tilbakeslagsventiltypen Socla 408 for åpen ventil (Socla, 2012)

Med utgangspunkt i Figur 18 er det laget formler for kurvene for dynametrene 125 mm og 150 mm for bruk i falltapsmodellen for stasjonær strømning, formlene er gitt i Figur 19, der x er vannmengde i m³/time og y er lik falltap i meter. De interessante vannmengdene er mindre enn 100 l/s = 360 m³/time.

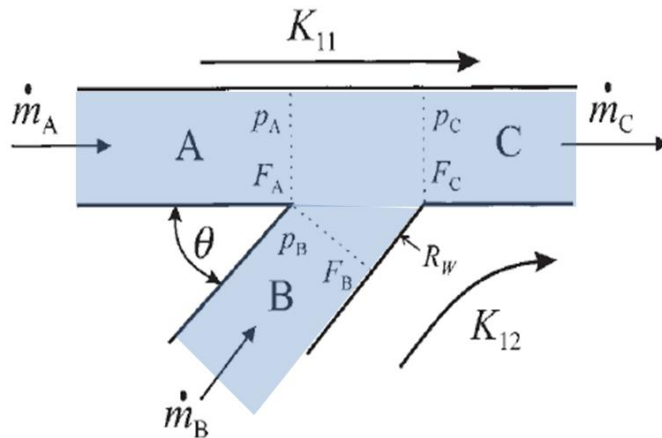


Figur 19 Tilpassing av formler for falltap i tilbakeslagsventiler 125 mm og 150 mm med utgangspunkt i avleste punkter hentet fra Figur 18. Formlene er benyttet i regneark for falltap ved stasjonær strømning.

3.1.4 Singulærtap i møtende rør

På alle stasjonene går to pumpeledninger fra hver sin pumpe og inn på den felles pumpeledningen. I dette avsnittet er det sett nærmere på hvordan geometrien og rørdiametrene i tilkoblingspunktet påvirker trykket i de møtende rørene. Et litteraturstudium på «T- junctions» er gjennomført. Den mest nyttige artikkelen viste seg å være «*Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions*», (Bassett, et al., 2001) som gir teoretiske utledninger av tapskoeffisienter verifisert med forsøk.

Hovedledningen har diameter mellom 315 og 500 mm, mens rørene fra pumpene har diameter 125 mm til 150 mm. Tilkoblingene i hver pumpestasjon er i prinsipp som i Figur 20, (Bassett, et al., 2001), hvor avløpsvannet fra pumpen kommer inn i ledningen betegnet ved B. Hovedtrykkledningen vises her som ledningsstrekket fra A til C.



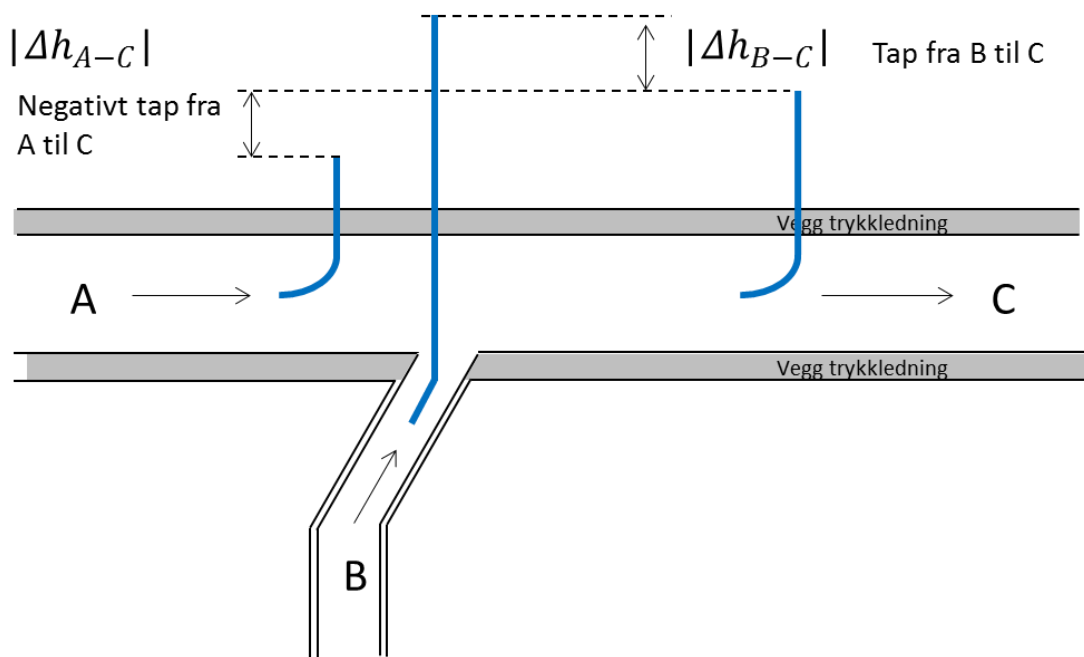
Figur 20 T rør (Bassett, et al., 2001)

Singulærtapskoeffisientene for de to strømnings-situasjonene er i figuren gitt ved K_{11} og K_{12} . K_{11} gjelder strømmingen som kommer fra hovedtrykkledningen og passerer det møtende røret gitt ved B. K_{12} gjelder strømmingen for vannet som pumpes fra pumpen og inn på hovedtrykkledningen. Falltapene kan uttrykkes:

$$\Delta h_{A-C} = \frac{\left(\left(p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot u_A^2 \right) - \left(p_C + \frac{1}{2} \rho \cdot u_C^2 \right) \right)}{\frac{1}{2} \rho \cdot u_C^2} \cdot \frac{u_C^2}{2 \cdot g} = K_{11} \cdot \frac{u_C^2}{2 \cdot g} \quad \text{Lign. 6}$$

$$\Delta h_{B-C} = \frac{\left(\left(p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot u_B^2 \right) - \left(p_C + \frac{1}{2} \rho \cdot u_C^2 \right) \right)}{\frac{1}{2} \rho \cdot u_C^2} \cdot \frac{u_C^2}{2 \cdot g} = K_{12} \cdot \frac{u_C^2}{2 \cdot g} \quad \text{Lign. 7}$$

Tapskoeffisientene kan i visse tilfeller bli negative. Dette gjelder for eksempel K_{11} når det pumpes intenst med stor vannmengde fra B. Negativ K_{11} betyr at Δh_{A-C} er negativ, Figur 21. Dette betyr at pumpen tilfører energi til vannet i hovedtrykkledningen og øker det hydrauliske potensialet i denne. Vannstrømmen fra pumpen kommer inn på skrå i ca. 45 grader med hovedledningen og spyles da inn vann i strømreringen.



Figur 21 Falltap ved overgang fra pumperør til hovedledning. Standrørene er bøyd i fartsretningen for å vise sum av trykkhøyde og hastighetshøyde. Standrørene er ikke vist i målestokk.

Basert på likevekt i knutepunktet og kontinuitet i vannmengder har (Bassett, et al., 2001) funnet formler for K_{11} og K_{12} som gitt ved
Lign. 8 og
Lign. 9:

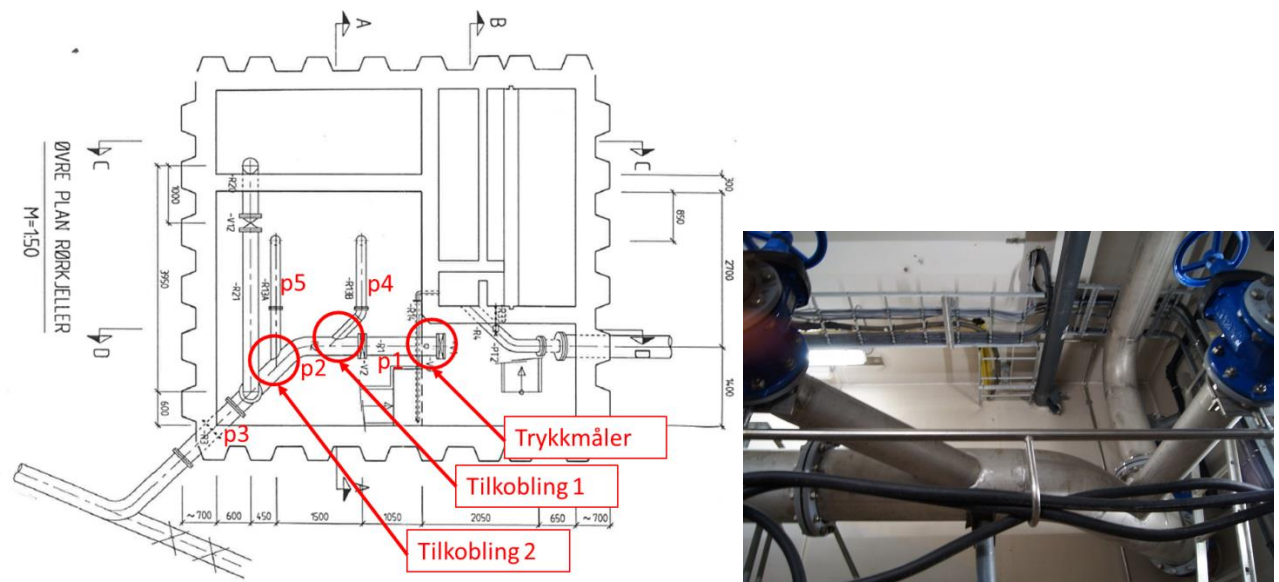
$$K_{11} = \frac{2 \cdot \psi}{\psi + \frac{1}{2} \cos(\Theta^*)} \cdot [1 - q^2 - (1 - q)^2 \cdot \psi \cdot \cos\Theta] + q^2 \cdot \psi^2 - 1 \quad \text{Lign. 8}$$

$$K_{12} = \frac{2 \cdot \psi}{\psi + \frac{1}{2} \cos(\Theta^*)} \cdot [1 - (1 - q)^2 - q^2 \cdot \psi \cdot \cos\Theta] + q^2 \cdot \psi^2 - 1 \quad \text{Lign. 9}$$

I formlene er:

$\psi = \frac{F_C}{F_B}$, $\Theta^* = \frac{3}{4} \cdot \Theta$, $q_{11} = \frac{m_A}{m_C}$, $q_{12} = \frac{m_B}{m_C}$ der F er brukt på rørens tverrsnittsareal og m for massen av vannmengde pr. tidsenhet. Indeksene viser til de møtende rør-endene, A, B og C, Figur 20. Vinkelen Θ er satt til 45° , men en justert Θ^* er benyttet i formlene for å få best overensstemmelse med forsøk.

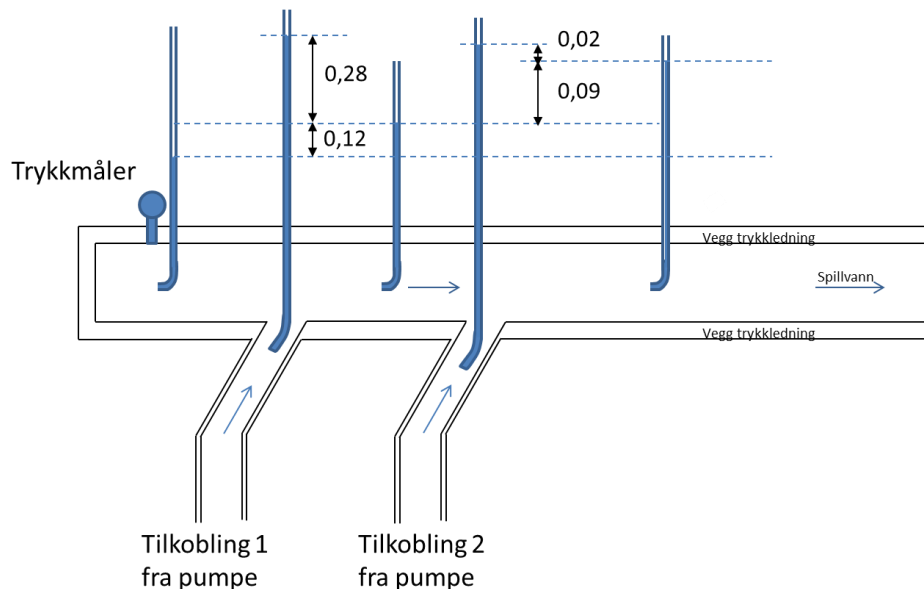
Betraktningene rundt falltap ved møtende rør har spesiell relevans for måling av trykk på hovedtrykkledningen i pumpestasjonene. Måling av trykk er en vesentlig del av dette arbeidet. Trykkmåleren på Brattørbrua står på enden av hovedtrykkledningen som er blind. En beregning er gjennomført for å se på trykkforskjeller gjennom stasjonen. For beregningene er det antatt at begge pumpene leverer 50 l/s. Dette gir trykkforskjeller i stasjonen uttrykt ved forskjeller mellom p1 til p5 der p1 er trykket ved måleren, p2 er trykket i hovedtrykkledningen mellom tilkobling fra de to pumpene. P3 er trykket på vei ut fra stasjonen. Beregningene er basert på Lign. 6 til Lign. 9 med tilhørende rørdiametre etc. Resultatene av beregningene er vist i tabell.



Figur 22 Brattørbrua pumpestasjon med trykkmåler og pumpetilkoblinger (Foto VN)

Tabell 8 Utregninger av falltap og trykkforskjeller internt i Brattørbrua pumpestasjon for pumpet vannmengde 50 l/s fra begge pumpene. Trykkforskjell mellom måler og utgående ledning er $(-0,12 \text{ mVs} - 0,09 \text{ mVs}) = -0,21 \text{ mVs}$. Betegnelser fra (Bassett, et al., 2001).

Tilkobling	Trykkforskjell	Hastighet, « u_c » [m/s]	$\psi = \frac{F_C}{F_B}$	Tapsfaktor	Potensialtap [mVs]
1	« Δh_{B-C} » = $p_4 - p_2$	0,64	4,41	$K_{12} = 13,6$	0,28
1	« Δh_{A-C} » = $p_1 - p_2$	0,64	4,41	$K_{11} = -5,8$	-0,12
2	« Δh_{B-C} » = $p_5 - p_3$	1,28	4,41	$K_{12} = -0,19$	-0,02
2	« Δh_{A-C} » = $p_2 - p_3$	1,28	4,41	$K_{11} = -1,5$	-0,09



Figur 23 Illustrasjon av beregnet falltap og trykkforskjeller internt i Brattørbrua pumpestasjon for pumpet vannmengde 50 l/s fra begge pumpene

Med henvisning til beregningsresultater i Tabell 8 illustrert i Figur 23 ser en at når det pumpes 50 l/s fra hver av pumpene på Brattørbrua er:

- (1) Trykkforskjellen mellom måler og utgående ledning ($-0,12 \text{ mVs} - 0,09 \text{ mVs}$) = $-0,21 \text{ mVs}$. Det betyr at trykket i utgående ledning er $0,21 \text{ mVs}$ høyere enn det måleren viser. Det er negative tap i strømrretningen.
- (2) Trykkforskjellen mellom måler og tilkoblings-ledningen fra den første pumpa er $0,28 \text{ mVs} + 0,12 \text{ mVs} = 0,40 \text{ mVs}$. Det betyr at trykket i ledningen fra pumpa (i det den går inn i hovedtrykkledningen) er $0,40 \text{ mVs}$ høyere enn det måleren viser.

Trykket på selve pumpa er enda større siden pumpa står lavere, men hastighetsleddet i potensialet ved pumpa er større enn i trykkledningen på grunn av større hastigheter og potensialet reduseres noe. Trykket ved pumpa kan beregnes om en tar hensyn til dette.

Oppsummert konkluderes det at beregningene viser relativt små trykkforskjeller på trykkledningen internt i pumpestasjonen på Brattøra Ved mindre vannmengder vil forskjellene være enda lavere.

Dette er en nyttig erkjennelse og innebærer at en for grove beregninger kan neglisjere tap i rørtilkoblingene inn i hovedledningen, såkalte «T-Junctions», og regne kun ett trykk i hovedtrykkledningen i hver pumpestasjon.

Formlene i dette avsnittet er likevel benyttet i komplett versjon i den stasjonære falltapsmodellen som er utviklet i Excel. Modellen gir derfor flere trykk i hver stasjon.

3.2 Falltapsmodell stasjonær strømning

3.2.1 Beskrivelse av modell

Det er utarbeidet en falltapsmodell for stasjonær strømning ved hjelp av Excel. Hensikten er å beregne hydraulisk potensial langs hele trykklinjen og i pumpestasjonene for gitte vannmengder. Potensialet er

beregnet og vist som en energilinje i meter vannsøyle (mVs) langs ledningen sammen med løpende kotehøyde for ledningen, Figur 26. Dermed framkommer både stedshøyde og trykkehøyde. Vannmengdene gis som input til modellen og kan gjerne være tatt fra målinger gjennom EAdata.

Modellen tar sitt beregningsmessige utgangspunkt i høydenivået på Ilsvika påslippstunnel, som i tegninger fra prosjekteringen fra 1990- tallet er estimert til 12,6 meter. Med ny høydereferanse er denne høyden 13,5 meter. Dersom det er overtrykk ved utløpet kan det gis en høyere verdi for å ta hensyn til dette. Trykket ca. 100 meter før utløpet er målt og er erfaringsmessig lavt med verdier mindre enn 1mVs.

Modellen tar utgangspunkt i lengder og diametere på hovedtrykkledningen mellom pumpestasjonene og beregner hydraulisk potensial ved å addere tap etter Darcy-Weisbachs ligning og singulærtap i bend og tilbakeslagsventiler. Singulærtapene i hver seksjon er fordelt jevnt langs seksjonens strekning. Det regnes sekvensielt langs ledningen fra Ilsvika påslippstunnel via pumpestasjonene Ils vikøra, Lillegata, Frostakaia. Beregningene gir til slutt hydraulisk potensial på pumpene og trykkmåleren ved Brattørbrua. Vannmengdene øker normalt fra Brattørbrua mot Ilsvikøra etter hvert som de enkelte stasjonene bidrar. Diameteren på røret øker også slik at hastigheten på vannet ikke nødvendigvis øker. Hastigheter blir beregnet og inngår i tapsberegningene.

For å finne friksjonsfaktoren f , er Reynolds konstant beregnet. Ruheten k , er input til modellen. For utregning av friksjonsfaktoren er det tatt i bruk en ferdig makro betegnet Moody Chart Solver (Cimbala, 2012). Tap i bend er beregnet ved å addere singulærkoeffisienten k_s for alle bend på hver av seksjonene mellom pumpestasjonene på ledningen. Antall bend på en seksjon er identifisert i kart med sine retningsendringer. Singulærkoeffisienten er gitt ved akkumulerte vinkelendringer samt tapsfaktoren k_{90} , Lign. 5. Tapsfaktoren k_{90} er input til modellen, Tabell 7 viser eksempler på verdier.

I stasjonene vil det hydrauliske potensialet variere internt innen en pumpestasjon ettersom det pumpes inn vann fra de to pumpeledningene som går fra hver sin pumpe og inn på den felles hovedtrykkledningen, se seksjon 3.1.4. Trykket er ikke det samme i inngående som i utgående hovedtrykkledning i en stasjon, men forskjellene er beregnet og funnet å være moderate. Beregningene av trykkforskjeller ved tilkoblinger av ledning fra pumpene inn mot hovedtrykkledningen er basert på formler presentert i litteraturen (Bassett, et al., 2001).

Mellom pumpene og hovedtrykkledningen er det tap i tilbakeslagsventiler. Dette er beregnet som vist i seksjon 3.1.3.

3.2.2 Regneark for falltapsmodell

For å gi et helhetlig bilde av falltapsmodellen er utsnittene fra regnearket vist i Figur 24 og Figur 25, selv om detaljene er lite lesbare. Beregningene resulterer i en energilinje langs trykkledningen som til eksempel er vist i Figur 26. Vannmengder målt under test av systemet den 12. mai 2015 er benyttet.

Resultater er vist og diskutert i kapittel 6, her beskrives kun selve beregningsmetoden.

Input gis i grønne felter. Dette er vannmengder, rørdiametre og lengder av hovedtrykkledningen. Ruhet for beregning av tap langs ledningen og tapsfaktor for singulærtap i et 90° bend er også input.

Detaljer om bend langs ledningen er ikke input, men er inkludert i uttrykkene som er brukt.

Endring i hydraulisk potesial inne i pumpestasjonene, langs hovedtrykkledningen i stasjonen								
Stasjon	Arealforhold fi = FC/FB	"K11-tap Pumpe 1" pumpe nr.1: q1="QA/QC"	K11 koeffisient	Delta H i hovedledning pga Pumpe 1	"K11-tap Pumpe 2" pumpe nr.2: q1="QA/QC"	K11 koeffisient	Delta H i hovedledning pga Pumpe 2	Sum endring i potesial i trykkledning i pumpestasjonen, Økt potesial ved negative verdier [m]:
Lillegata	16	0.861	-0.254	-0.011	0.984	0.024	0.001	-0.010
Lillegata	12.96	1.000	0.000	0.000	0.961	0.040	0.002	0.002
Frostakaia	7.11	0.781	-0.189	-0.008	0.765	-0.247	-0.018	-0.026
Brattørbua	4.41	0.000	-5.863	-0.091	0.483	-1.153	-0.077	-0.168

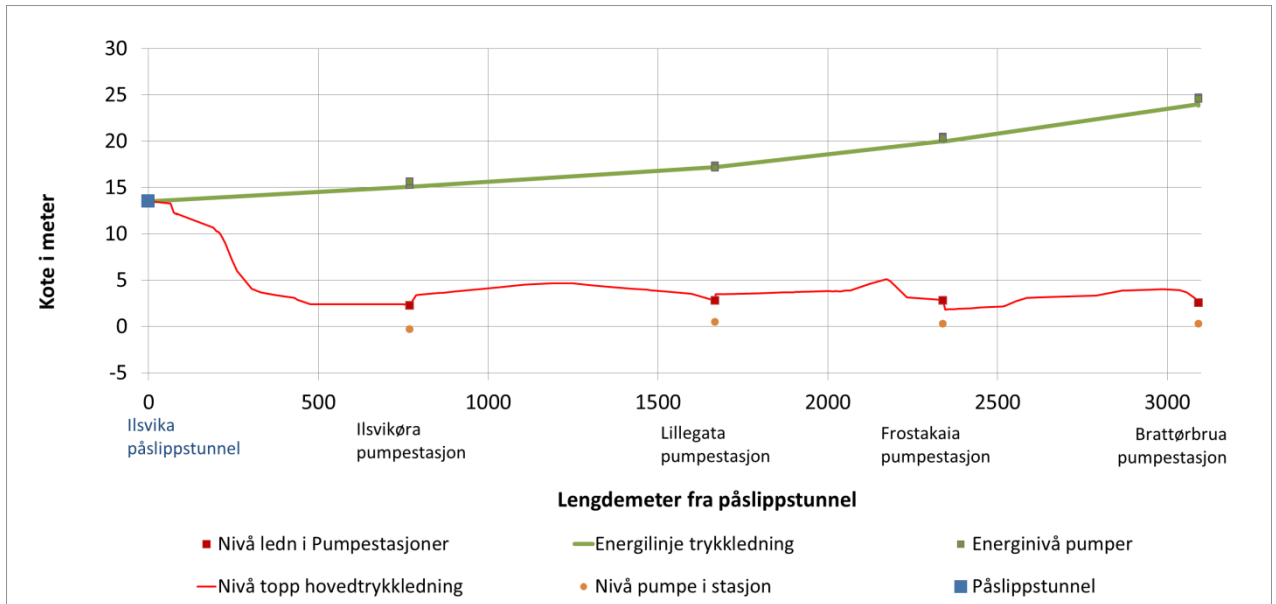
$$K_{11}^{(0)} = \frac{m_{1f} \psi}{\psi + \frac{1}{2} \cos(\theta + \psi)} \cdot [1 - q^2 - (1 - q)^2 \cdot \psi \cdot \cos\theta] + q^2 \cdot \psi^2 - 1$$

$$K_{12} = \frac{2 \cdot \psi}{\psi + \frac{1}{2} \cos(\theta + \psi)} \cdot [1 - (1 - q)^2 - q^2 \cdot \psi \cdot \cos\theta] + q^2 \cdot \psi^2 - 1$$

Endringer i hydraulisk potesial inne i pumpestasjonene, fra pumper til hovedtrykkledning

Sum tap mellom hovedtrykkledning og Pumpe, (K12 + tilbakeslag.) Ved Pumpe av gis verdien på trykkledningsiden av tilbakeslagsventilen.

Figur 25 Andre del av regneark for stasjonær falltapsmodell. Verdier som er satt inn er hentet fra testkjøring 12. mai 2015.



Figur 26 Eksempel på beregningsresultater fra stasjonær falltapsmodell laget i Excel. Verdier som er satt inn er hentet fra testkjøring 12. mai 2015.

3.3 Transient strømning

3.3.1 Generelt om trykkstøt

Trykkstøt i pumpeledninger kan oppstå ved brå oppstart av pumper eller ved stenging og åpning av ventiler samt ved tømning/sammentrykking av store luftlommer i rør. Når vannet bremses opp settes bevegelsesenergi om til trykkenergi. Dette kan føre til utmattingsbrudd i pumpeledningen. Et stort antall middels kraftige trykkvekslinger er kritisk (Mosevoll, 1988).

Et luftputekammer, også kjent som en trykklufttank, reduserer både trykksenkningen og trykkstigningen som eksempel skapes når pumpen stopper. Ved hurtig stans av pumper vil vannet i pumpeledningen være i bevegelse. Luftputekamrene sørger for en gradvis reduksjon i hastighet og trykk i ledningen. De fire luftputekamrene virker som fire ikke-lineære fjærer i et dynamisk system der vannstrengen mellom pumpestasjonene blir masser.

Når en pumpe starter eller stopper akselereres eller retarderes vannstrømmen i ledningen. Ved momentan bråstopp av en pumpe kan en se for seg at en vannpartikkel i røret rett etter pumpa bråstopper. Hastigheten endres brått fra en hastighet v , til null. Dette er som å dra brått i halen på den strømmende vannstrengen. Trykket i ledningen ved pumpa faller drastisk. Trykkfallet og hastighetsendringer vil forplante seg med lydets hastighet i vannet bortover ledningen styrt av vannets volumkompressibilitet. Virkningen er som et slag og kalles på engelsk «water hammer».

Joukowski, (Joukowski, 1898), fant en ligning for trykkendringen, som enkelt kan utledes basert på kontinuitet, vannkompressibiliteten og Newtons 2. lov:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho c \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{Lign. 10}$$

der P er trykket, v er vannhastighet, ρ er tettheten av vann og c er lydhastigheten i vann. Ligningen forteller at dersom hastigheten endres svært raskt med Δv i et uendelig stivt rør er den maksimale trykkreduksjonen lik:

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \Delta v \quad \text{Lign. 11}$$

For $\Delta v = 1 \text{ m/s}$ og $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ og $c = 1430 \text{ m/s}$ får vi: $\Delta p = 1430000 \text{ Pa} = 1430 \text{ kPa} = 143 \text{ mVs}$. Dette er en voldsom trykkendring. Endringen er negativ dersom endringen skyldes en momentan (teoretisk) pumpestopp. Et slikt trykkfall fører til kavitasjon eller rørkollaps. Røret kan klappe sammen om røret ikke er sterkt nok.

Forplantningshastigheten for en sjokkbølge i røret er gitt av væskens bulkmodul K , og rørstivheten E , ved:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K}{E} \cdot \frac{D}{e} \cdot C}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad \text{Lign. 12}$$

hvor:

K = Væskens elastisitet (Kompressibilitet)

ρ = væskens tetthet $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

E = E-modulen til rørmaterialet $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$

D = Innvendig diameter [m]

e = Veggtykkelse

C = Koeffisient for innspenning. Settes for VA- ledninger som oftest til 1,0

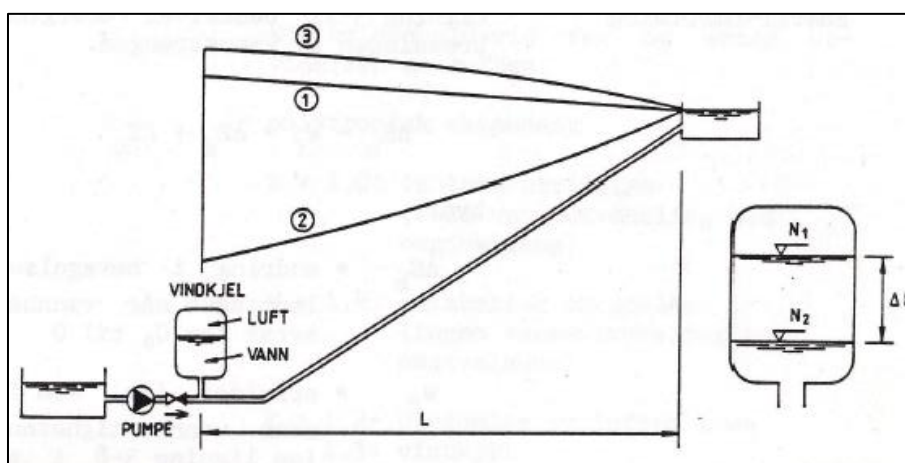
I trykkstøsimuleringer omtalt i kapittel 7 er hastigheten i hovedtrykkledningen bestående av PE beregnet til å være fra 200- 300 m/s. For stive rør blir hastigheten rundt 1430 m/s.

For $c = 300$ m/s gir Lign. 11 lavere trykkendring enn for stive rør. For $c = 300$ m/s får en $\Delta p = 300000$ Pa = 300 kPa = 30 mVs. En slik negativ trykkendring vil kunne gi kavitasjon (trykk lavere enn 10mVs).

I praksis stopper ikke pumpene momentant og videre vil trykkluftstankene i pumpestasjonene levere vann når en pumpe stopper. Dermed dempes trykkbølgene og en unngår de store og ødeleggende trykkendringene.

3.3.2 Svingninger i systemet

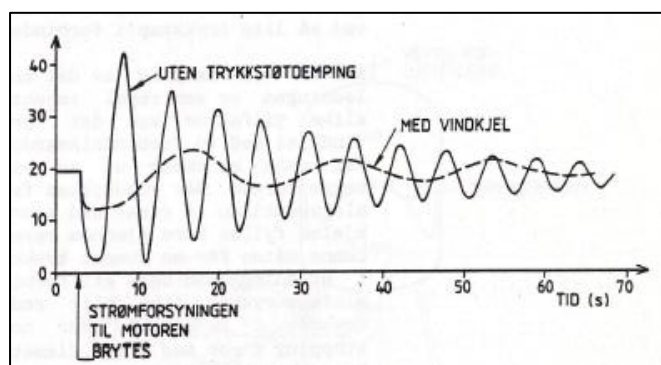
Hovedtrykkledningen i Trondheim har fire pumpestasjoner og er relativt kompleks. Prinsippene er likevel de samme som for enkle anlegg. Illustrasjonen i Figur 27 viser et enkelt pumpeanlegg som pumper vann gjennom en trykkledning opp til et reservoar. Anlegget er utstyrt med en trykklufttank for å dempe trykkstøt.



Figur 27 Pumpeanlegg med luftputekammer (Mosevoll, 1988)

Trykkstøt i anlegg med trykkluftstank kan med fordel betraktes som to superponerte mekanismer. Den ene er en forplantning av en sjokkbølge og dennes refleksjoner fra ledningens ender. Den andre fremstår som stivelegeme bevegelse av en vannmengde i vekselvirkning med et trykkluftkammer.

Trykkstøt ved pumpestopp like nedstrøms en pumpestasjon slik som for systemet i Figur 27, er illustrert i Figur 28. Figur 28 viser svingninger uten luftrykkammer ved heltrukket linje og med luftrykkammer ved stiplet linje. Endringen i dominerende svingemønster grunnet luftrykkammeret er tydelig (Mosevoll, 1988).



Figur 28 Trykkstøt ved pumpestopp med og uten luftputekammer (Mosevoll, 1988)

Den raske svingningen i Figur 28 skyldes en forplantende trykkbølge som slår fram og tilbake mellom ledningens ender. Svingetiden er $T_1=2L/c$. Den trege svingningen i Figur 28 er gitt ved egensvingeperioden, T_2 :

$$T_2 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g \cdot \frac{A_r}{A_{ekv}}}} \quad \text{Lign. 13}$$

der ekvivalent bassengtvverrsnitt i luftrykkskammeret, A_{ekv} , er gitt ved:

$$A_{ekv} = \frac{1}{\frac{1}{A_v} + \frac{\kappa \cdot H_1}{V_0}} \quad \text{Lign. 14}$$

hvor:

κ = Adiabatisk eksponent

L = Lengden på rørledningen [m]

A_r = Tverrsnittsarealet på rørledningen [m²]

A_v = Vannspeilet i trykkluftstanken [m²]

H_1 = Absolutt trykk i trykkluftstanken ved stasjonær drift [mVs]

V_0 = Luftvolumet i trykkluftstanken ved stasjonær drift [m³]

Talleksempel med verdier representative for hovedtrykkledningen i Trondheim:

- (1) For en seksjon på hovedtrykkledningen i Trondheim mellom to stasjoner kan en sette L= 600 meter. Med $c = 300$ m/s blir svingetiden for en reflekterende bølge i denne seksjonen ca. $T_1 = 2L/c = 4$ sek.
- (2) Med luftrykkammer (vindkjel) vil hele vannstrengen etter pumpestopp komme i svingninger. Dersom en ser isolert på en seksjon mellom to stasjoner kan en grovt anslå svingetiden for den trege svingeformen fra Lign. 13 og Lign. 14. Dette gir:

$$T_2 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{600m}{10 \text{ m/s}^2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,2^2}{1 + \frac{1,2 \cdot 30}{1}}}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{600m}{10 \text{ m/s}^2 \cdot 2,39}} = 31,5 \text{ s} \quad \text{Lign. 15}$$

Beregningen er svært grov siden systemet inneholder flere trykkluftskammer og ledningsseksjoner. Den gir likevel en antydning av størrelsesorden på svingetid. Vi må forvente mange titalls sekunder i svingetid for hele systemet. T_2 uttrykker en svingeform der en stor masse med vann i rørstrengen svinger med luften i luftrykkammeret som en fjær. Mer nøyaktige beregninger er utført ved simuleringer i HYTRAN programmet, se kapittel 7.

3.3.3 Trykklufttanker

Trykklufttanker kalles også vindkjeler. Virkningen kan illustreres ved eksempelet i Figur 27. Ved stasjonær drift er trykklinjen som vist ved linje 1 og luftrykket i tanken er lik trykket i den nedre enden av pumpeledningen etter korrigering for høydeforskjellen mellom trykkledningen og vannspeilet i trykkluftstanken. Vannoverflaten i tanken vil ved stasjonærdrift være på nivå N_1 vist i Figur 27. Trykklinjen for minimum og maksimum trykk vises henholdsvis ved linje 2 og 3. Vannivået i tanken vil ved minimum trykk være på N_2 i figuren. Tilbakeslagsventilen lukker kort tid etter pumpestans. Vannstrengen i pumpeledningen bremses sakte opp og vanntilførselen fra trykkluftkammeret sørger for

at trykket ikke synker i like stor grad som uten trykkluftkammer. Når vannhastigheten er redusert til null vil trykklinjen ved pumpestasjonen ligge lavere enn bassenget/ utløpet. Dette er en ustabil situasjon og vannstrømmen vil deretter snu og lufttrykket vil igjen fylles med vann. Luftvolumet vil da avta og lufttrykket i tanken stiger, noe som etter hvert vil bremse vannstrengen. Luftputen vil fungere som en fjær som demper svingningene hvor stivheten øker med økende trykk i tanken. Svingetiden er som gitt av Lign. 13 og Lign. 14. Vannstrengen vil på grunn av friksjonskrefter og tyngdekraft til slutt stoppe helt opp. Trykklinjen vil da ligge høyere enn bassenget ved utløpet og vannet fra tanken begynner å strømme ut igjen (Mosevoll, 1988).

Det er et luftputekammer på hver av de fire pumpestasjonene. Luftputekammeret på Brattørbrua har et totalvolum på 2 m³, det vil si 2000 l. Luftputekammeret på Brattørbrua, vist i Figur 29, er plassert i øverste plan av stasjonen. Tilkoblingsrøret fra hovedtrykkledningen og opp til luftputekammeret har en diameter på 250 mm. Arbeidstrykket i tanken på Brattørbrua pumpestasjon er på 10 Bar mens testtrykket er 13 Bar.

Luftputekammeret på Frostakaia, Lillegata og Ilsvikøra pumpestasjoner har et totalvolum på 1 m³, det vil si 1000 l. Tankene på Lillegata og Frostakaia pumpestasjon er vist i henholdsvis Figur 30 og Figur 31. Tilkoblingsrøret fra hovedtrykkledningen og opp til luftputekamrene i de tre stasjonene har en indre diameter på 250 mm. Tilkoblingsrøret i Frostakaia er vist i Figur 32. Ytre diameter på trykktanken er 950 mm. Tykkelsen på tanken er 3 mm, noe som resulterer i en indre diameter på 944 mm. Arbeidstrykket i tanken på de tre stasjonene er på 6 Bar, mens testtrykket er 7,8 Bar. Målene på tankene er hentet fra vertikalprofil av tankene (Mellemsæther, 2015).



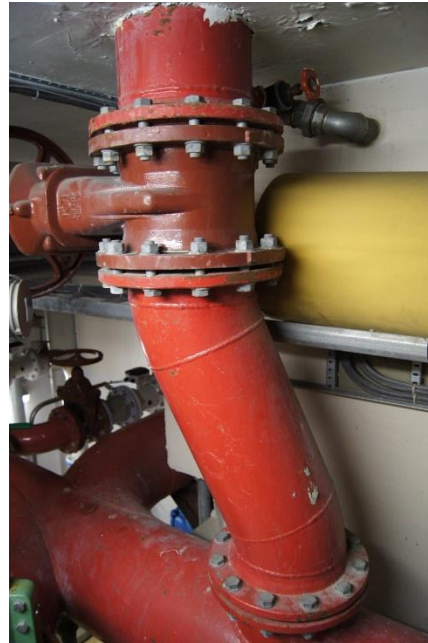
Figur 29 Luftputekammer på Brattørbrua pumpestasjon (Foto VN)



Figur 30 Luftputekammer på Lillegata pumpestasjon (Foto VN)



Figur 31 Luftputekammer på Frostakaia pumpestasjon (Foto VN)



Figur 32 Tilkobling i mellom Hovedtrykkledning og luftputekammer på Frostakaia pumpestasjon (Foto VN)

3.4 Modellering av transient strømning - Hytran

3.4.1 Generelt

Måledata fra trykkmålingene, kapittel 5, viser tydelig at ved pumpestopp og start er det svingninger i systemet. Målingene fanger opp de trege svingningene som er dominert av trykktankene og massen vann i ledningene, mens de raske svingningene fra sjokkbølger i ledningene er lite synlige siden det tas målinger kun hvert 10. sekund. Målingene viser at det tar tid fra en pumpe starter eller stopper til en igjen har en stasjonær strømmingstilstand.

Målinger for en slik dynamisk tilstand kan med fordel sammenlignes med simuleringer for å se om systemet oppfører seg som ventet, og om en har kontroll over de viktigste faktorene som styrer en slik tilstand. HYTRAN er et programsystem som kan brukes til slike beregninger. HYTRAN beregner dette numerisk basert på ligninger gitt i neste seksjon.

3.4.2 Styrende ligninger og tidsinkrementering

Forplantning av en trykkbølge, med trykk og hastighetsendringer i tid og rom (avstand langs ledningen) er bestemt av følgende to ligninger der den første kommer fra kravet om kontinuitet for en kompressibel væske og den andre er Newtons 2. lov.

$$\frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{1}{B} \frac{\Delta p}{\Delta t} = 0 \quad \text{Lign. 16}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} + \frac{f}{2D} v(t, x) |v(t, x)| = 0 \quad \text{Lign. 17}$$

Ved å kombinere ligningene får en Joukowski's formel.

Programmer som HYTRAN løser Lign. 16 og Lign. 17 langs ledningen ved å se på alle $x_i = x_{i+1} + \Delta x$ langs ledningen for en gitt tid t_i og valgt Δt . Beregningen gjentas for økende tid $t_{j+1} = t_j + \Delta t$. Her er i inkrementnummer i sted og j er inkrementnummer i tid. Tidsinkrementet Δt er relatert til korteste rørlengde i modellen. Hytran trenger en startilstand for inkrementering i tid med gitt hastighet og trykk langs ledningen for $t = 0$.

Inkrementeringen starter i prinsipp ved den rørende der en introduserer en endret grensebetingelse, gitt som funksjon av tiden. Grensebetingelsen kan være en kurve som viser hvor fort en pumpe stopper opp (reduksjon i vannmengde ned til null mot tid).

Trykklufttanker bringes inn ved egne ligninger som styrer vannmengde inn og ut av tanken mot trykk i tanken. Ligningene for trykkluftstanken løses ved inkrementering i tid når algoritmen får den x verdi der tanken står. Ligningene kommer fra gasslovene og er av typen:

$$p \cdot V^\kappa = \text{konstant} \quad \text{Lign. 18}$$

der p er trykket i tanken og V er luftvolumet i tanken. Koeffisienten κ er 1 for konstant temperatur og 1.4 for adiabatisk utvidelse. Ved raske endringer er κ nærmere 1,4 enn 1,0. $\kappa = 1,3$ kan være en akseptabel verdi.

3.4.3 Oppbygning av modell i HYTRAN

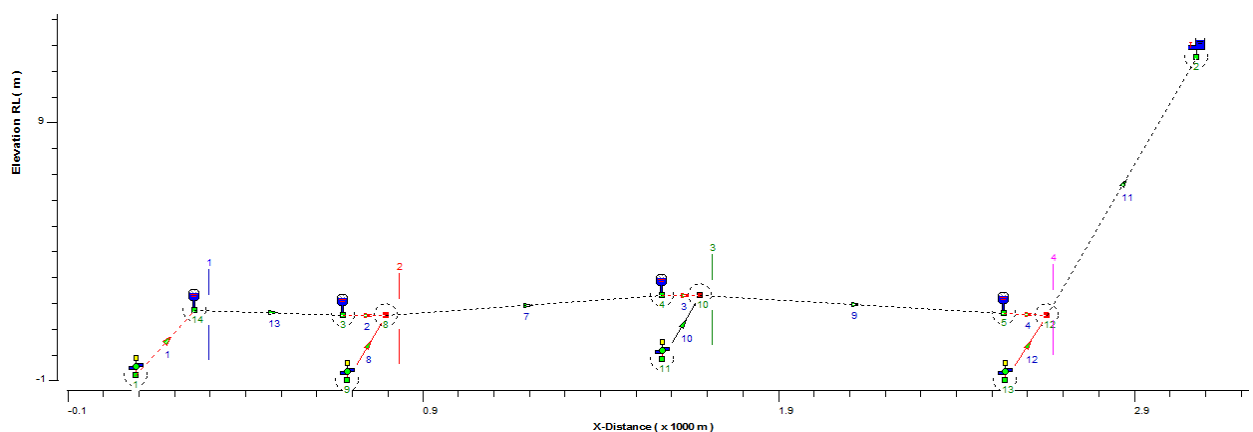
For å analysere transient strømning i hovedtrykkledningen var det ønskelig å ta i bruk et beregningsprogram. Det ble etter leting på nettet funnet at programmet HYTRAN kunne passe godt til en slik analyse. Hytran står for «HYdraulic TRANsients», og er laget for å analysere transient strømning og trykkstøt i ledninger. Programmet er et av flere programmer for beregning av svingninger og trykkstøt, som er i bruk i dag rundt omkring i verden. HYTRAN er utviklet av professor Norman Lawgun på New Zealand (Lawgun, 2015).

Undertegnede tok kontakt per mail med Professor Norman Lawgun i Hytran Solutions som var svært velvillig og ga en gratis studentlisens for to måneder. Han har gjennom utveksling av email vært til stor hjelp ved både installering og forståelse av programvaren.

Programmet har grafisk grensesnitt der ledningsnettets kan tegnes inn i plan og profil. For anvendelse på hovedtrykkledningen i Trondheim sentrum var det tilstrekkelig med en profiltegning som fulgte ledningen x akse som løpende lengde langs ledningen fra 0 til ca. 3100 meter. Det ble bygget en modell som inneholdt selve trykkledningen, korte ledninger i stasjonene mellom pumpene og trykkledningen, pumper og trykkammer i alle stasjonene. Ledningens høydeprofil er gitt inn i nytt koordinatsystem ved utløp i Ilsvika påslippstunnel på kote 13,5 meter. Pumpene i stasjonene ligger mellom kotene -0,31 meter og 0,48 meter. Overkanten av hovedtrykkledningen ligger mellom kote 2,29 meter og kote 2,82 meter i stasjonene i nytt høyde-koordinatsystem.

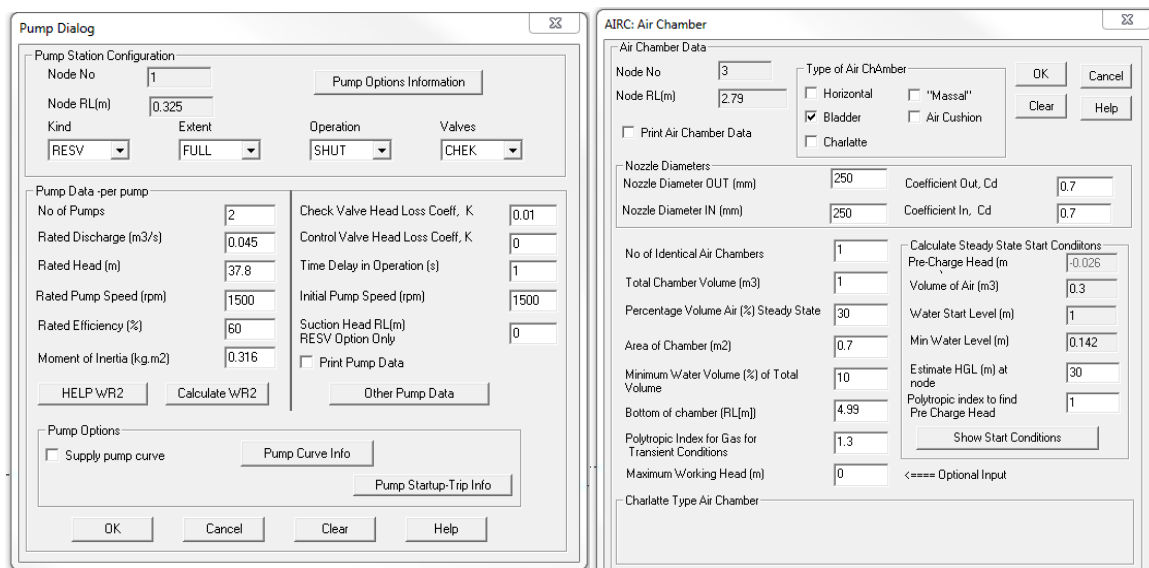
Denne informasjonen er tatt inn i HYTRAN ved modellering. På grunn av korte ledninger fra pumpe til hovedtrykkledning er tegningen av anlegget ikke i skala, men skjematisk. Tegning i skala ville vært ulesbar. Det grafiske bildet viser ledningsseksjoner, pumper og trykkluftstanker.

Modellen er vist i Figur 33 som et nett med ledninger mellom noder. Pumpestasjonene, trykkluftstankene og rørmøter ligger i nodene. Endenoden til høyre i systemet representerer utslippet til Høvringen tunnel, altså Ilsvika påslippstunnel, som blir en randbetingelse av typen nedstrøms reservoar. Rørsystemet innen hver stasjon er modellert som rør med null lengde, «dummy pipes».



Figur 33 Hovedtrykkledningen og de fire pumpestasjonene opptegnet i Hytran

HYTRAN starter sin beregning ut fra en gitt stasjonær driftstilstand og konsistent informasjon om denne må oppgis. Informasjonen omfatter hydraulisk potensial i alle noder, vannmengder pumpet, friksjonsforhold, trykk i trykkstanker osv. HYTRAN foretar en beregning og sjekker om all informasjonen om stasjonærtilstanden er konsistent. Dersom den ikke er konsistent, foreslår HYTRAN justeringer for å tilfredsstillte ligningene som bestemmer energilinjens.



Figur 34 HYTRAN, Dialogbokser for informasjon om (a) pumper og (b) trykkluftstanker

For å simulere for eksempel pumpestopp korrekt, må det gis informasjon om pumpene, Figur 34 (a). Pumpehastigheten må oppgis i rpm (omdreininger per minutt), treghetsmomentet for bevegelige deler, effektiviteten til pumpen og en kurve som karakteriserer pumpestopp. Informasjon om tilbakeslagsventilene er gitt i dialogboks for pumpene. Dialogboksen til trykktankene, Figur 34 (b), inneholder mellom annet spesifisering av type, diameter på rør inn til tanken, tverrsnittsareal i tanken, totalt volum og prosentandel luft. Adiabatisk eksponent, («Polytropic index for gas»), gjelder kompresjon av luften i kammeret og for transient tilstand settes den ofte til mellom 1,2 og 1,4.

Resultater fra beregninger med HYTRAN er gitt i kapittel 6.

3.5 Sedimentering og selvrensing

Selvrensing i rør er et viktig funksjonskrav for dimensjonering avløpsrør (Lysne, 1976). Ved lave hastigheter kan partikler sedimentere og bli liggende på bunnen av ledningen slik at avløpstransporten hindres eller blokkeres. Kraftbalanse i et vannfylt, horisontalt, rørelement er gitt av likhet mellom skjærspenningen, τ , ganger innvendig areal av røret på den ene siden og trykkforskjellen over rørlengden, L , ganger tverrsnitts-arealet av røret på den andre. Trykkforskjellen er $\gamma \cdot h_f$ og vi får:

$$2\pi R \cdot L \cdot \tau = \pi R^2 \cdot \gamma \cdot h_f$$

Lign. 19

hvor:

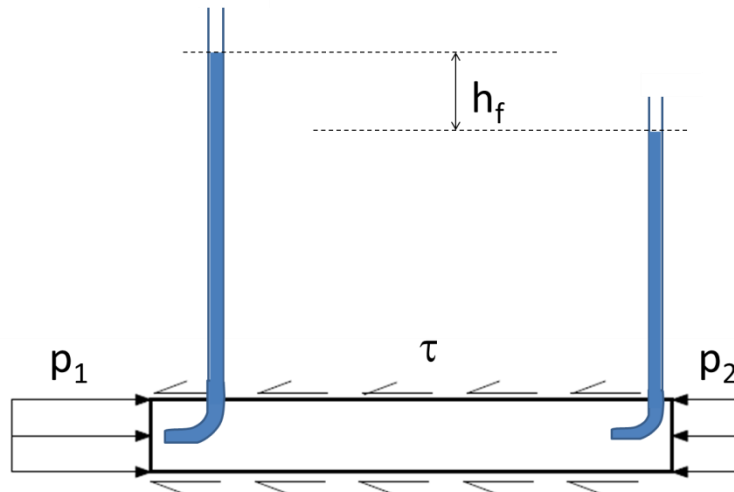
L = Lengden på rørelementet [m]

R = Rørets radius [m]

τ = Gjennomsnittlig skjærspenning $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

$\tau = \rho \cdot g =$ Vannet spesifikke vekt $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

h_f = Tap i hydraulisk potensial over lengden L



Figur 35 Sedimentering i ledning

Ved å sette inn for h_f i Darcy- Weisbachs ligning vil en kunne få et uttrykk for hastigheten v :

$$v = \sqrt{8 \cdot \frac{\tau}{f \cdot \rho}} = \sqrt{8 \cdot \frac{\tau}{f \cdot 10^3}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{Lign. 20}$$

Det forutsettes at τ settes inn i N/m^2 . Minstekrav til skjærspenning for fylte rør settes ofte til $2 N/m^2$. Beregnede verdier for v_{\min} er gitt i Tabell 9. Det fremgår at v_{\min} må være i størrelsesorden 1 m/s for å sikre selvrensing.

Tabell 9 Selvrenningskriterier for fylte rør med verdier av τ , for $D = 200 - 1000$ mm, (Lysne, 1976). Verdiene i tabellen kan benyttes som selvrenningskriterie for fylte rør. For ledninger med opp til 10 % motfall er 10 % økning av hastigheten tilstrekkelig

Rørtype	τ [N/m^2]	f	v [m/s]	Anbefalt v_{\min}
Betongrør	2	0,026 - 0,021	0,79 - 0,87	~ 0,80
Betongrør	4	0,026 - 0,021	1,10 - 1,23	~ 1,15
Plastrør	2	0,017 - 0,014	0,97 - 1,06	~ 1,00

3.6 Ansamling av luft i ledningen

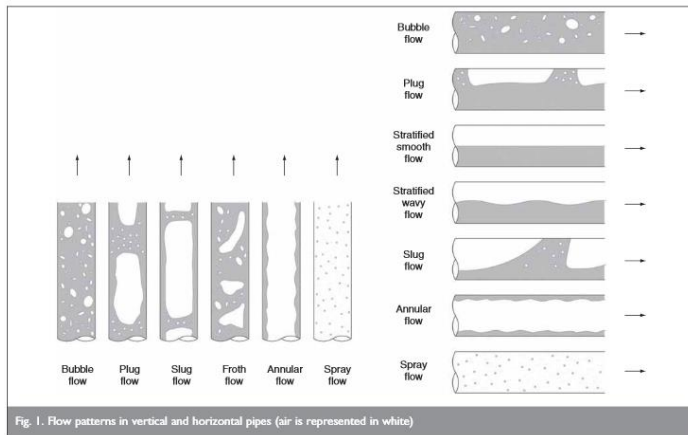
Luft i trykkledninger kan forårsake en rekke driftsproblemer og er svært uønsket. Trykkledninger bør derfor utformes slik at luft ikke kommer inn på ledningen og at gass ikke utvikles i ledningen, (Ødegaard, et al., 2012).

Det kan være en rekke årsaker til at det kommer inn luft i en pumpeledning. Hvis vannstanden i pumpeumpen blir for lav vil en kunne få luftinnsuging. Dette kan skje hvis nivåbryteren streiker eller er stilt inn for lavt. Det kan også oppstå luft sugende virvler i pumpeumpen som kommer inn i sugerøret til pumpen. Pumpestopp kan forårsake uforutsett stor ettersugning fra pumpeump, (Mosevoll, 1976).

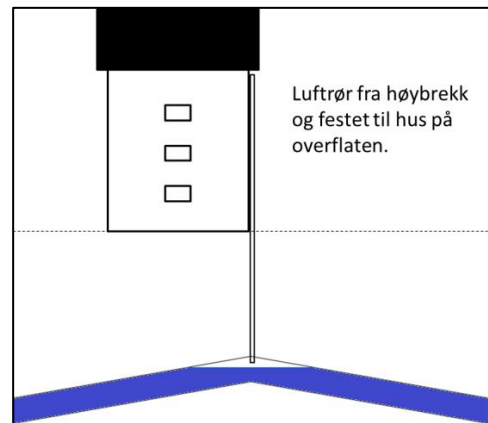
Det ble ved studier av EA – data i forbindelse med prosjektoppgave (Nordal, 2014) funnet tilfeller hvor pumpene på Lillegata pumpestasjoner «slurper og går» selv om vannnivået i pumpeumpen vedvarende er på et minimum. Dette vil kunne suge luft inn i pumpa og sende luften videre til trykkledningen.

Tilstedeværelse av luft vil kunne resultere i forstyrrelse av vannstrømmen og redusert kapasitet.

Luft i rør kan generelt også være gasser med varierende bestanddeler. For vann og avløpssystem er det hovedsakelig tre måter å håndtere opphopning av luft på. (1) Hindre at luft kommer inn i selve ledningen eller dannes i ledningen. (2) Slippe ut luften ved bruk av et stigerør eller en luftventil koblet til ledningen i selve høybrekket, Figur 37. (3) Sørge for at luften blir med vannstrømmen ved at hastigheten overskrider den kritiske vannhastigheten for fjerning av luft.

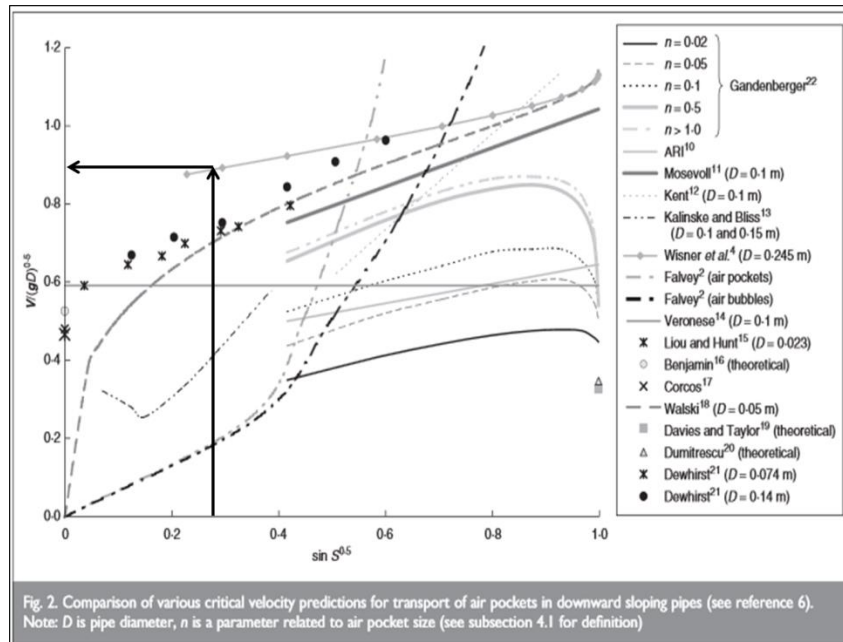


Figur 36 Forskjellige strømningsmønstre for luft i ledninger (Escarameia, 2005)



Figur 37 Skisse over tenkt luftrør koblet til høybrekk på en trykkledning.

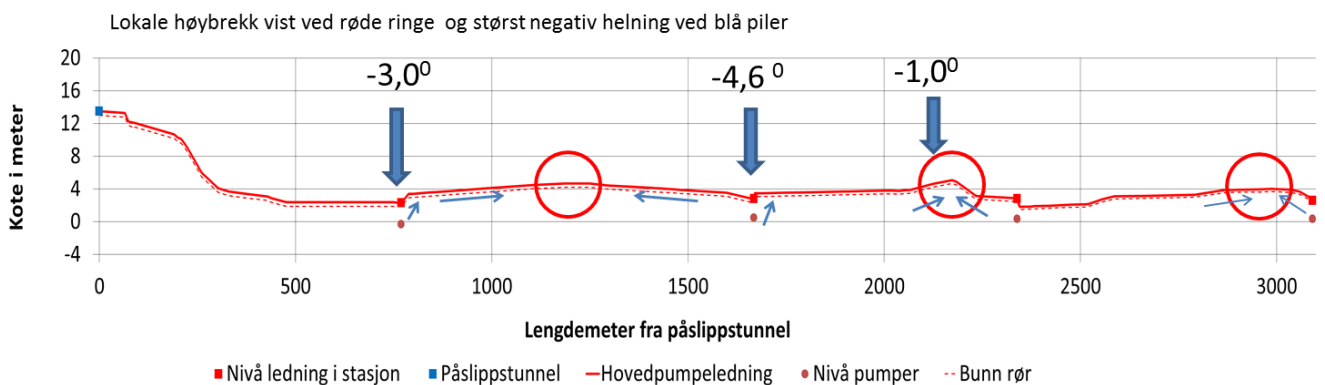
Helningen på trykkledningen og forholdet mellom vann og luft i ledningen er med å avgjøre hvordan luften fordeler seg i vannet, se Figur 36.



Figur 38 Kritiske hastigheter for luft i hellende ledning (Escarameia, 2005)

Resultater fra eksperimentelle studier, (Escarameia, 2005), er gjengitt i Figur 38, som viser nødvendige minimumshastigheter for å dra med seg luft når røret heller nedover i strømrretningen. Helningen er gitt på horisontal akse uttrykt ved $(\sin S)^{0,5}$, der S er den negative helningen i grader eller radianer. Den vertikale aksene angir minste hastighet for å dra med seg luften (og dermed for å tømme ledningen for luft) uttrykt ved $v/(g \cdot D)^{0,5}$. Forsøkene er gjennomført for trykkrør med diametere opp til 0,25m. Gyldigheten ved anvendelse på større diametere kan diskuteres men resultatene gir en pekepinn.

Det er interessant å se på muligheten for at det ansamles luft i hovedtrykkledningen i Midtbyen. Dersom det kommer luft inn eller dannes luft i ledningen vil luften kunne samles i luftlommer i lokale høybrekk langs ledningen, Figur 39. Det er hovedsakelig tre lokale høydepunkt skissert med røde ringe. Ledningens helning i grader er bestemt langs hele profilet ut i fra koordinater og høydeangivelser. Det er de negative helningene i strømrretningen som er kritiske for at luften ikke blir med vannstrømmen. De største negative helningene for ledningen er angitt med blå piler i figuren. Den største negative helningen er $-4,6$ grader som gir $(\sin S)^{0,5}$ på 0,28.



Figur 39 Hovedtrykkledningen i profil med lokale høydepunkt utsatt for ansamling av luft

Ledningens høyeste negative helning $(\sin S)^{0,5} = 0,285$ gir ut fra Figur 38 $v/(g \cdot D)^{0,5} = 0,9$. Denne helningen ligger like ved Lillegata pumpe-stasjon, på stekningen i mellom Lillegata og Ilsvikøra, og ledningen har en diameter på 0,4 meter. Minste kritiske hastighet er dermed:

$$\frac{v_{kritisk}}{\sqrt{g \cdot D}} = 0,9 \quad \text{Lign. 21}$$

$$v_{kritisk} = 0,9 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 0,40} = 1,78 \frac{m}{s} \quad \text{Lign. 22}$$

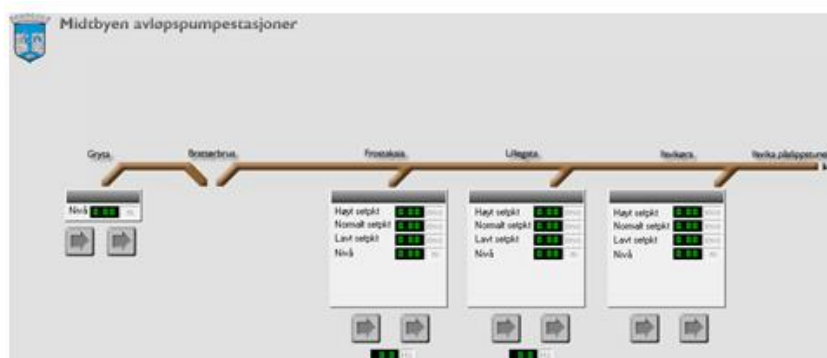
Denne hastigheten er høy og kunne antyde at eventuell luft i ledningen ikke bli med vannstrømmen men kan samles i et høybrekk. Det er likevel usikkert om forsøksresultatene, (Escarameia, 2005), på mindre rørdiametre opptil 0,25 meter kan anvendes på et 0,4 meters rør. En helning på 4,6 grader er bare på en svært kort del av røret noe som gjør det vanskelig å konkludere.

4 TIDLIGERE OG NY INSTRUMENTERING AV ANLEGGET

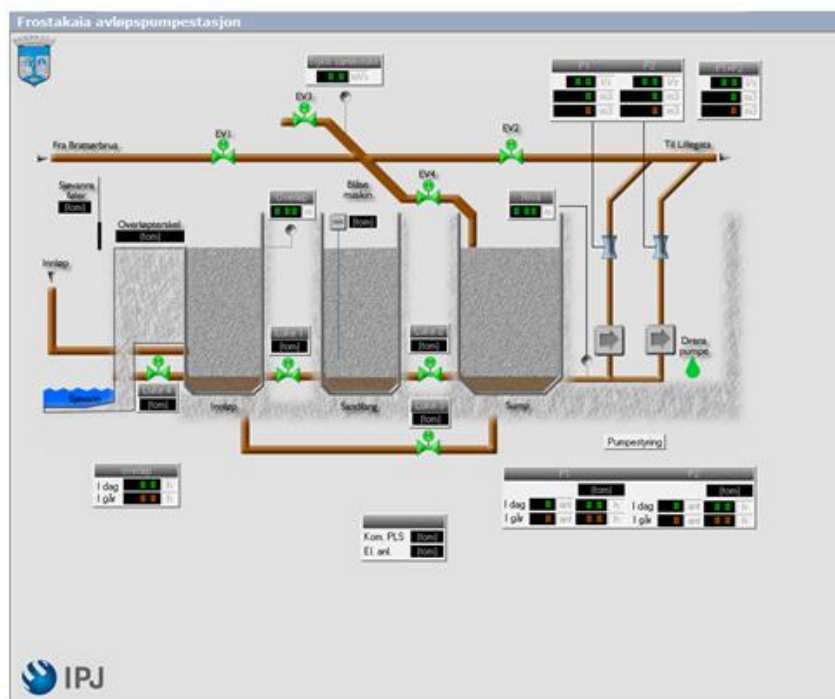
Dette kapittelet omhandler instrumenteringen av anlegget og tilgjengelig informasjon i EAdata for overvåknings og driftskontroll. Anlegget er levert av Ingeniørfirma Paul Jørgensen AS (IPJ) i Trondheim, (Paul Jørgensen AS, 2015). Kapittelet inkluderer også arbeid med å etablere nye trykkmålere som en del av denne masteroppgaven.

4.1 Om EAdata

Overvåkningsanlegget og data fra dette betegnes ofte som EAdata eller EA driftskontroll. Trondheim kommune ved IPJ har gitt undertegnede tilgang til historiske data fra EA - data for hele Trondheim for perioden 1. januar 2014 til 15. mai i forbindelse med denne masteroppgaven.



(a) Oversiktsbilde fra EA- data



(b) Prosessbilde fra Frostakaia pumpestasjon

Figur 40 Oversiktsbilde fra EA- data (a) og prosessbilde fra Frostakaia pumpestasjon (b) (Paul Jørgensen AS, 2015)

Eksempel på framvisning av EA - data på skjerm er vist i Figur 40. Figur 40 (a) er hentet fra EA- data og viser pumpestasjonene fra Brattørbrua til Ilsvika påslippstunnel. Undertegnede har hatt en begrenset tilgang til EA- data, noe som innebærer at sanntids driftsdata ikke vises. Derfor vises heller ikke tallene i rubrikkene i Figur 40 (a). For hver av pumpestasjonene finnes et prosessbilde som vist for Frostakaia pumpestasjon i Figur 40 (b).

4.2 Tilgjengelig informasjon i EAdata

Tilgjengelig informasjon i EAdata vedrørende det avskjærende trykkavløpssystemet er oppsummert i

Tabell 10. Informasjonen innhentes ved elektroniske sensorer i pumpestasjonene. Det ble i slutten av 2014 montert vannmålere på Frostakaia og Iilsvikøra pumpestasjoner og tatt ut data fra og med henholdsvis 18.11.2014 og 19.02.2015. Dette er ny informasjon som ikke var tilgjengelig for arbeidet med prosjektoppgaven 2014. Det er som en del av masteroppgaven installert trykkmålere, som er beskrevet i mer detalj senere. Vannmålingene og trykkmålingene har vært viktig for analyseringen av systemet og kvalitetssikring av falltapsmodell for stasjonær strømming.

Tabell 10 Tilgjengelig informasjon som framkommer i EAdata fra hver pumpestasjon og trykkledning

	Brattørbrua	Frostakaia	Lillegata	Iilsvikøra	Påslippstunnel
Sensor pumpe av/på	Av/på info for begge pumper	Av/på info for begge pumper	Av/på info for begge pumper	Av/på info for begge pumper	
Vannmåling	Vannmengde fra pumpe 1 og 2	Vannmengde fra pumpe 1 og 2	Vannmengde fra pumpe 1 og 2	Vannmengde fra pumpe 1 og 2	Vannmengde fra trykkledningen
Pumpesump	Nivå i pumpesump	Nivå i pumpesump	Nivå i pumpesump	Nivå i pumpesump	
Overløp	Vann går i overløp ja/nei		Vann går i overløp ja/nei	Vann går i overløp ja/nei	
Trykksensor	Trykkmålinger før inn-pumping	Trykkmålinger før inn-pumping	Trykkmålinger før inn-pumping	Trykkmålinger før inn-pumping	Trykkmålinger like før påslipp til Høvringen-tunellen

4.3 Arbeid for å etablere trykkmålinger på stasjonene

I forbindelse med prosjektoppgave ved NTNU høsten 2014 fant undertegnede en tilsynelatende uoverensstemmelse mellom beregnet trykk ut i fra falltap og pumpekaraktistikker. Dette kunne tyde på at det var sedimenter eller luft i ledningen. Uoverensstemmelsen innebar at det var sterkt ønskelig med måling av trykk i hovedtrykkledningen. Arbeidet med dette ble igangsatt våren 2015 som del av denne masteroppgaven. Undertegnede fikk anledning til å arbeide med valg og plassering av elektroniske trykksensorer, samt være med på installasjon av de innkjøpte målerne. Selve oppkoblingen og implementeringen i overvåkningssystemet er utført av Ingeniørfirma Paul Jørgensen AS (IPJ). Dette har omfattet innpassing i eksisterende Programmerbar Logisk Styring, PLS, og framvisning på skjerm i EA - data. Trykkmålerne ga registreringer av trykk fra slutten av april 2015.

Uoverensstemmelsen mellom de beregnede trykkehøyder ut fra pumpekaraktistikkene og trykkehøyder fra falltapsberegninger gjennomført i prosjektoppgaven ble presentert av undertegnede i møte med Trondheim Kommune ved Andreas Ellingsson og Kyrre Halvorsen 21. januar 2015. Veileder Sveinn T. Thorolfsson var til stede. Møtet konkluderte med at det var samlet interesse for å få til trykkmålinger på selve hovedtrykkledningen. Trondheim Kommune ville ta utgiftene for innkjøp av trykkmålere og installering. Undertegnede tok kontakt med doktorgradsstudent Kaspar Vereide, som har god kjennskap til trykkmålinger knyttet til struping i svingekammer. Kaspar Vereide delte sine erfaringer om utstyr og steg i prosessen, noe som var veldig nyttig. Det ble jobbet med å finne tilgjengelige punkter på ledningen for installasjon av trykkmålere. Det var ønskelig å gjennomføre trykkmålinger der hvor vannet ikke ble forstyrret av bend eller avgreininger. I utgangspunktet var tanken å måle trykket i hver stasjon et lite stykke etter påkoblingen fra pumpene i retning Ila. Det er imidlertid ikke store lengden av

hovedtrykkledningen som er tilgjengelig etter at pumpeledningene fra hver sin pumpe går inn på den felles pumpeledningen. Kyrre Halvorsen foreslo å sjekke om det var eksisterende ventiler som kunne brukes for installasjon av trykkmålere. Dette viste seg å stemme for alle stasjonene unntatt Brattørbrua pumpestasjon. Plasseringen av målerne ble derfor på hovedtrykkledningen inne stasjonen et lite stykke før pumpevannet fra stasjonen sendes inn på hovedtrykkledningen.

4.3.1 Piezo- resistive trykkmålere

Gunnar Mosevoll i Skien kommune ble kontaktet for å få råd om trykkmålere og tilkobling. Han anbefalte Piezo-resistive trykkmålere og bidro med nyttig informasjon og tips. Skien kommune hadde god erfaring med bruk av en måler produsert av Wika; Pressure transmitter Model S-10. En tilsvarende måler fra Danfoss med tilsvarende spesifikasjoner ble valgt.

Trykkmålerne som er installert er av merket Danfoss Type MBS 3250 (Danfoss, 2014), med måleområde 0-10 bar, Figur 43. Piezo-resistive trykkmålere bruker krystaller hvor den elektriske motstanden er svært følsom for påført trykk. Piezo kommer fra greske pïesis som betyr trykk mens resistans er elektrisk motstand. Piezo-resistive trykkmålere består vanligvis av fire silisiumkrystaller som er koblet sammen til en full målebro. Når vanntrykket endrer seg vil den elektriske motstanden i krystallene endre seg. Ved å tilføre elektrisk spenning vil en kunne måle endringen i elektrisk motstand (Mosevoll, et al., 1991).

Når trykket er i mellom 5-10 % og 100 % av den maksimale måleverdien vil målenøyaktigheten vanligvis være på 1 % eller bedre. Tidligere har Piezo-resistive trykkmålere vært følsomme ovenfor temperatur på grunn av at den elektriske motstanden i silisiumkrystaller er svært følsom for endringer av temperaturen. Nye målere er derimot konstruert slik at vanntemperaturen i liten grad påvirker trykkmåleren. (Mosevoll, et al., 1991)

Trykkmålere bør monteres slik at den i minst mulig grad er utsatt for begroing og sedimenter. Piezo-resistive målere slik som Piezo-elektriske trykkmålerne bør kalibreres med jevne mellom mellom avhengig av trykkmålerens og vannets kvalitet. Hyppigheten på kalibreringen kan variere på alt fra 1 gang i uken til 1 gang per år. Målenøyaktigheten reduseres av vannkvaliteten og krever en hyppigere rengjøring av trykkmålerne. (Mosevoll, et al., 1991)

4.3.2 Installasjon

Målere ble installert på Brattørbrua, Frostakaia, Lillegata, og Ilsvikøra pumpestasjoner 23. mars 2015 av Nyhavna mekaniske AS. Det ble også montert en trykkmåler i Ilsvikøra påslippstunnel.

På Brattørbrua pumpestasjon fantes ingen tilgjengelig påkoblingsmulighet. Pumpeledningen ble derfor stengt og tømt slik at det ikke var vann i ledningen. Det ble så boret hull på ledningen for å sveise fast en gjenget rørstuss. Prosessen er vist i Figur 41. Kuleventilen, vist i Figur 42, ble festet med rørtetningssnor og tetnings- lim. Til slutt ble trykkmåleren, Figur 43, skrudd ned i kuleventilen.

På Frostakaia, Lillegata og Ilsvikøra pumpestasjoner ble allerede eksisterende ventiler tatt i bruk for installasjon av trykkmålerne, Figur 44, Figur 45 og Figur 46. Det samme ble gjort i Ilsvikøra påslippstunnel hvor det allerede var påkoblet en ledning med kuleventil, Figur 47.

I uke 15 ble det av elektriker trukket kabler fra trykkmålerne fram til kontrollenheten, PLS. Ingeniørfirma Paul Jørgensen AS (IPJ) sørget for å legge inn målingene i EA- data.



Boring av ledningen



Gjengesylinder sveiset fast til hovedtrykkledningen



Kuleventil ferdig montert



Trykkmåler ferdig montert med oppkobling til PLS

Figur 41 Montering av trykkmåler på Brattørbrua pumpestasjon (Foto VN)



Figur 42 Kuleventil som brukt på Brattørbrua pumpestasjon (Foto VN)



Figur 43 Piezo resistiv trykkmåler, Danfoss Type MBS 3250 (Foto VN)



Figur 44 Ventil og montert trykkmåler på Frostakaia (Foto VN)



Figur 45 Ventil for trykkmåler på Lillegata (Foto VN)

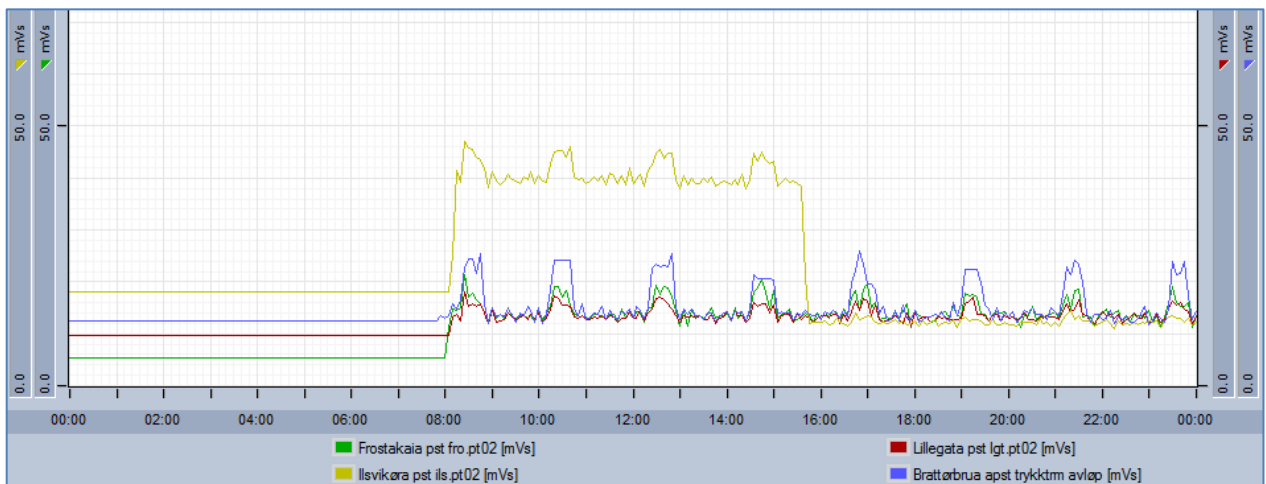


Figur 46 Ventil for trykkmåler IISVIKØRA
(Foto VN)



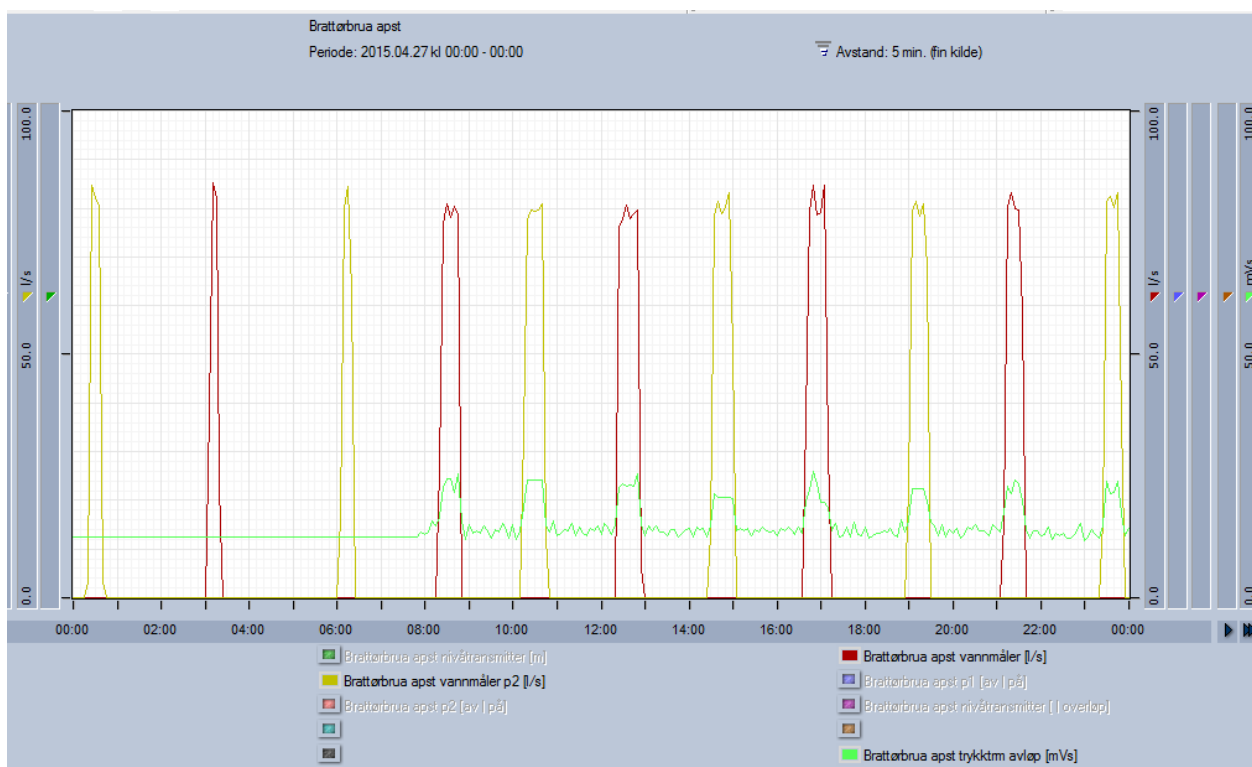
Figur 47 Ventil i IISVIKØRA påslippstunnel
(Foto VN)

De første målingene av trykk ble innhentet hos IPJ fredag 24. april 2015. Registreringene viste overraskende lave verdier for trykket alle stasjonene. Trykkmålingene var tilnærmet konstante og uavhengige av om pumpene gikk eller ikke. Dette ga litt hodebry men årsaken ble funnet ved nøye gjennomgang av bilder tatt onsdag 22. april. Disse viste at kuleventilene mellom trykkledningen og sensorene så ut til å være stengt. Undertegnede kontaktet pumpegruppa ved Asbjørn Mellemsæther som kunne bekrefte at ventilene mellom trykkmålerne og hovedtrykkledningen faktisk hadde vært stengt. Etter åpning av ventilene viste EA- data verdier som forventet, med unntak av målingene fra IISVIKØRA pumpestasjon.



Figur 48 Oppstart av trykkmålingene (Paul Jørgensen AS, 2015)

Figur 48 viser trykkmålinger fra 27. april 2015, i det ventilene ble åpnet noe etter 8. Trykket i IISVIKØRA pumpestasjon var urimelig høyt og en feil ble funnet og korrigert ca. klokken 16. Deretter ser en at energipotensialet har høyest verdier i Brattørbrua pumpestasjon vist ved blå kurve. Etter dette følger Frostakaia pumpestasjon med grønn kurve og Lillegata pumpestasjon med rød kurve før IISVIKØRA med lavest verdi. Trykket øker når pumpene starter syklisk utover kvelden.



Figur 49 Målinger av trykk og vannmengde i Brattørbrua pumpestasjon 27. april 2015

Figur 49 viser vannføring og trykkmålinger fra Brattørbrua pumpestasjon. Figuren viser at trykket øker når pumpene på stasjonen starter og trykket faller når pumpene skrues av. Figuren viser en samstemmighet mellom trykk og vannmengde og bidrar til tiltro til trykkmålingene. Energipotensialet vises på figuren ved den grønne kurven med benevnning mVs.

4.3.3 Kalibrering og vurdering av målenøyaktighet

Trykkmålerne er kalibrert før levering. Målerne ble ikke operative før 27. april. En egen kalibrering av trykkmålerne installert på pumpestasjonene ble ikke mulig.

I følge produsent av trykkgiverne Danfoss er målenøyaktigheten (accuracy) typisk $\leq \pm 0,5\%$ FS og maksimalt $\leq \pm 1\%$ FS. FS betyr «Full Scale» og er for de installerte målerne 100 mVs. Dette innebærer at måleren kan vise opptil ± 1 mVs feil. En har dermed en usikkerhet i måleverdien på ± 1 mVs. Målerne kan ha mindre nøyaktighet ved registreringer under 10 mVs.

Nøyaktigheten på trykkmålerne er i dette arbeidet vurdert ved å ta utgangspunkt i en lengre periode uten pumping fra noen stasjoner i forkant av pumpe-test 12. mai 2015. Målerne viste konstante verdier i en periode på over to timer mens alle stasjonene sto. Det er å forvente at målerne da skal vise trykk tilsvarende antall vertikale meter fra måleren og opp til utløpet i Ilsvika påslippstunnel.

Tabell 11 Vurdering av målenøyaktighet til trykkmålerne ut fra stasjonær tilstand uten pumping

Måler på pumpestasjon	Høydenivå måler, (kote ny ref.) [m]	Høyde opp til utløp på kote 13,5 [m]	Målt trykk i [mVs]	Avvik i mellom målt og beregnet trykk
Brattørbrua	2,7	10,8	14,5	3,7
Frostakaia	3,1	10,4	14,0	3,6
Lillegata	3,1	10,4	13,5	3,1
Ilsvikøra	2,6	10,9	11,9	1,0
Påslippstunnel	13,3 (Litt før utløp)	0,2	0,2	-

Målerne er installert mellom 0,15 og 0,3 meter over topp ledning i stasjonene. Kote for ferdig installert måler er gitt i tabellen, og varierer i mellom 2,6 meter og 3,1 meter over havet i ny referanse. Dette gir en relativt lik høyde opp til utløp på mellom 10,4 og 10,9 meter. En skulle forvente målt trykk lik dette. I stedet måles det mellom 11,9 og 14,5 meter. Avviket i mellom målt og beregnet mVs er mellom 1 meter og 3,7 meter i stasjonene. Måleren i trykkledningen ca. 100 meter før utløp viser en forventet og lav verdi på 0,2 meter.

Med en målenøyaktighet oppgitt fra produsent på maksimalt ± 1 % tilsvarende ± 1 meter er avvikene store. Det er vanskelig å forklare avviket i Lillegata, Frostakaia og Brattørbrua, som viser 3,1 til 3,7 mVs for høyt trykk, siden vannstrengen i trykkledningen i dette tilfellet står i ro i over to timer.

Det ville ut i fra dette vært ønskelig med en kalibrering av installerte målere ved å sette på trykk direkte på måleren.

5 ANLEGGETS FUNKSJON VURDERT UT I FRA MÅLTE DATA

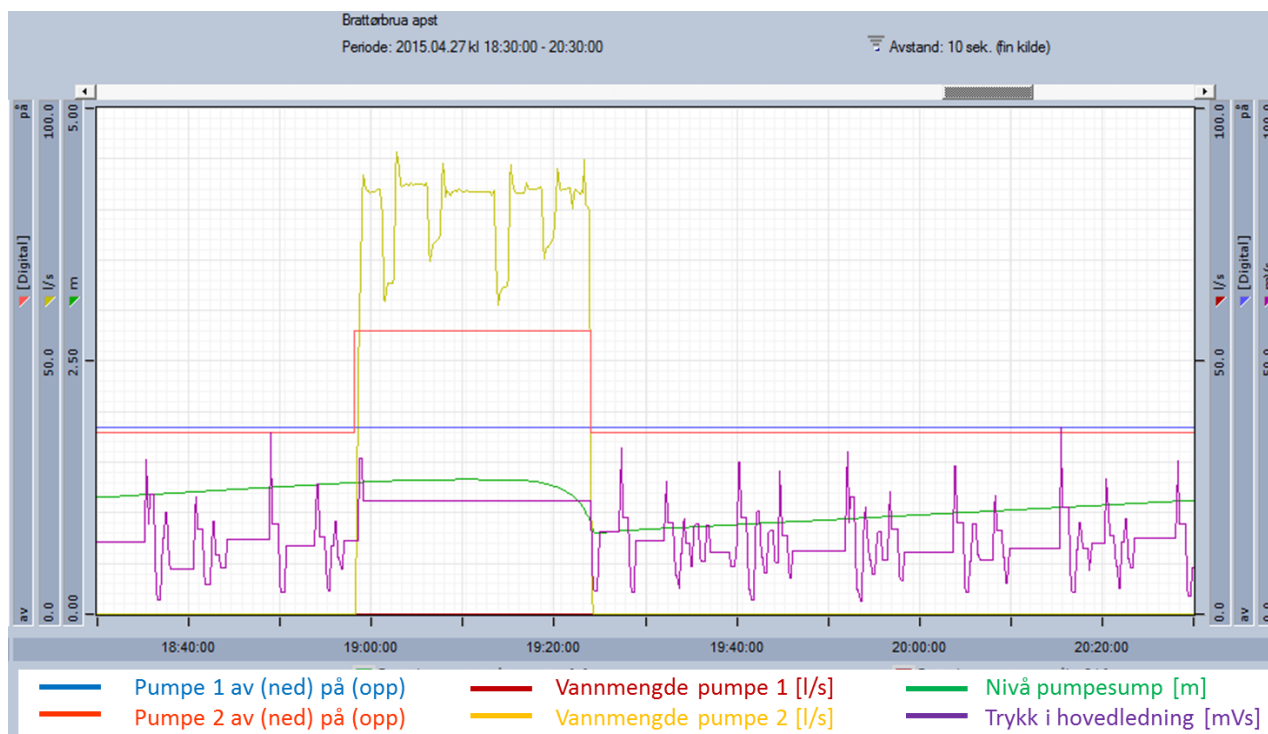
Dette kapittelet omhandler analyse av anlegget og tar utgangspunkt i målte data. For å analysere systemet er det valgt å se på to situasjoner for driften. Det er valgt å studere EAdata for et tilfelle med normal drift og et tilfelle hvor systemet kjøres med full kapasitet. Hensikten med analysen er å gi innsikt i hvordan systemet faktisk fungerer.

5.1 Normal drift

For å analysere normal drift var det ønskelig å finne en situasjon uten store mengder nedbør. Ved å se på pumpedriften var det mulig å finne pumpesituasjoner som var veldig typiske. Tidsintervallet 18:30 til 20:30 den 27. april var et av mange intervaller som er representativt for hvordan pumpene i de fire stasjonene normalt opererer.

Vannmengdene som pumpes fra hver av de fire pumpestasjonene er svært avhengige av hverandre.

5.1.1 Analyse av data fra hver pumpestasjon



Figur 50 Brattørbrua pumpestasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30

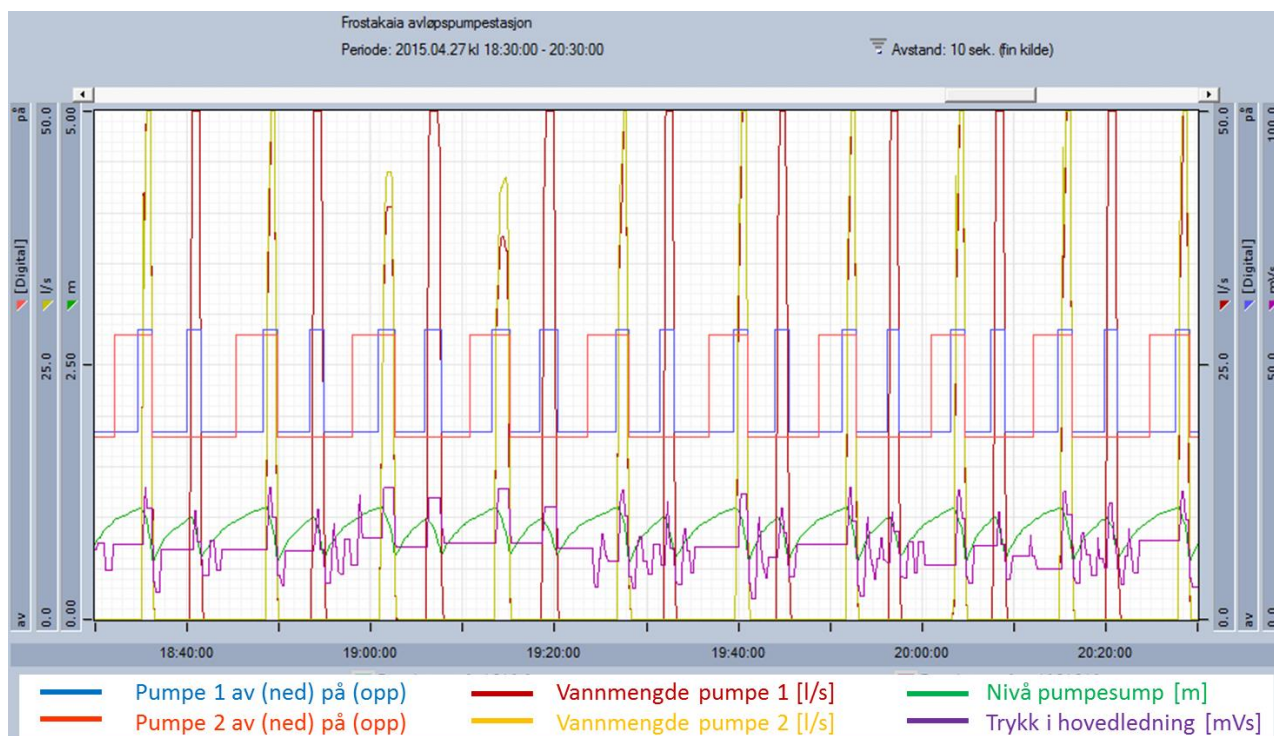
Normalt går pumpene i Brattørbrua pumpestasjon alternerende. Brattørbrua synes å være karakterisert av at pumpene går lenge med betydelig opphold i mellom. Hver av pumpene går ca. 25 minutter med ca. 4 til 5 timer mellom hver oppstart. Dette innebærer at det går en Pumpe i 25 minutter ca. hver annen time.

For tidsintervallet 18:30 til 20:30 den 27. april går Pumpe 2 på Brattørbrua i 26 minutter fra klokken 18:58 til 19:24, se Figur 50. Vannmengden som pumpes fra en Pumpe varierer mellom 60 l/s og 90 l/s avhengig av om det pumpes fra andre stasjoner. I stasjonære perioder når pumpene på Frostakaia står stille, leverer en Pumpe på Brattørbrua i underkant av 85 l/s. Målingene på Brattørbrua pumpestasjon forstås bedre når de sammenlignes med målingene fra de andre pumpestasjonene.

Måleren for vannstanden i pumpeumpen viser verdier i mellom 0,8 og 1,3 meter. Måleren ser ut til å registrere tregt, i det den ikke gir endring før lenge etter at pumpene på stasjonen har startet å levere store mengder vann.

Trykket på hovedtrykkledningen varierer betydelig med svingninger knyttet til start og stopp av pumpene i hele systemet.

Trykket har i den viste perioden en maksimal verdi på 35,8 mVs og en minimumsverdi på 2,4 mVs. Dette er kortvarige trykkverdier som er forårsaket av pumpestart og pumpestopp på de andre stasjonene. Trykket ligger på i størrelsesorden 13 til 14 mVs når pumpene på Brattørbrua står stille. Når pumpene på Brattørbrua går, viser denne målingen et konstant trykk på 22.4 mVs.



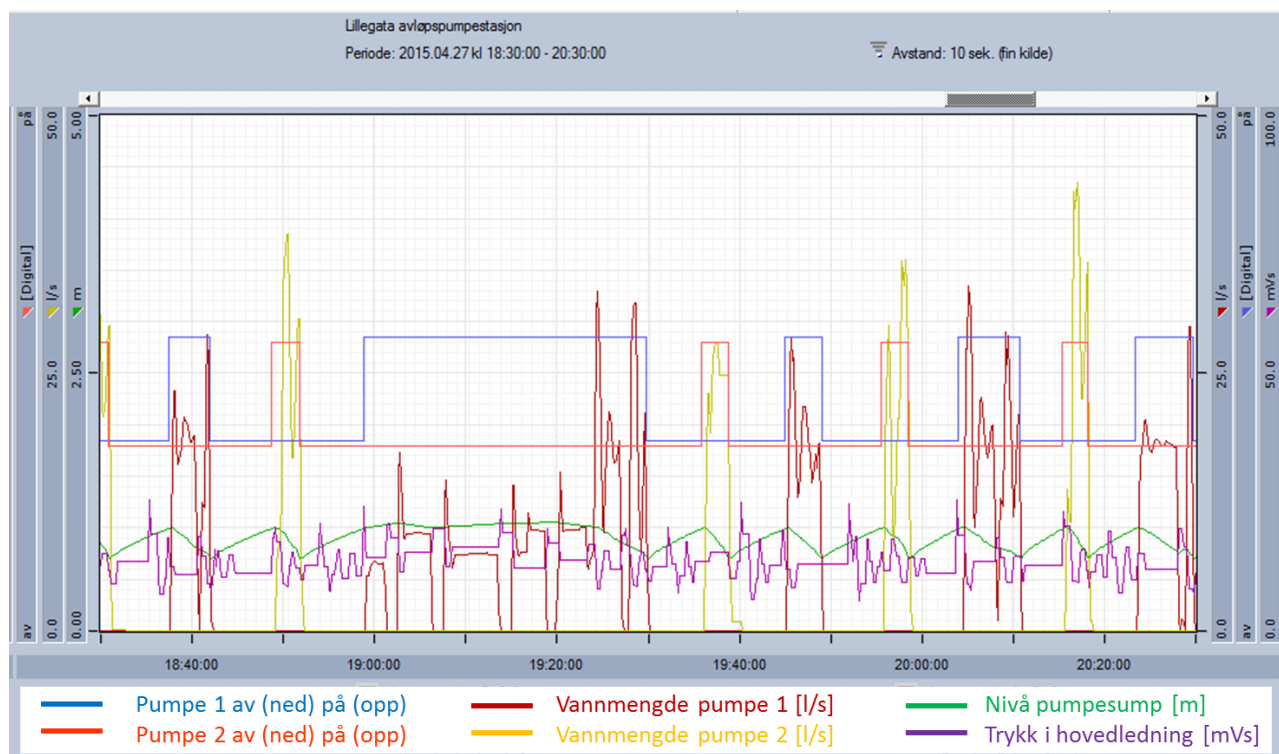
Figur 51 Frostakaia pumpestasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30

Målingene for tidsintervallet for Frostakaia pumpestasjon er vist i Figur 51. Pumpene på Frostakaia pumpestasjon går relativt regelmessig, men ikke etter forventet alternerende mønster. Pumpe 1 går normalt. Den starter når vannet i pumpeumpen når 1,0 meter og stopper når nivået i pumpeumpen har kommet ned på 0,6 meter. Pumpen går med en varighet på ca. 1 minutt, og har en relativ høy start/stoppfrekvens på 13 minutter mellom hver gang den går alene. Pumpe 2 på Frostakaia ser ikke ut til å virke alene. Den kobles inn ved 1,0 meter i pumpeump, men leverer ikke vann. Når nivået er steget til 1,1 meter, starter pumpe 1, og begge pumpene leverer vann. Dette kan være en midlertidig situasjon, men data viser at problemet har vedvart over lengre tid. Det er interessant at pumpe 2 likevel leverer når den kjører sammen med pumpe 1.

Vannmengdene som pumpes fra Frostakaia er i perioder over 50 l/s, noe som innebærer at dataene er utenfor målområdet. Bruk av dataene vil underestimere mengden vann som pumpes fra stasjonen. Det er tydelig hvordan vannmengden som leveres fra Frostakaia påvirkes av om det samtidig pumpes fra Brattørbrua. Dette er spesielt synlig når to pumper går på Frostakaia og leverer til sammen vel 80 l/s mellom klokken 19:00 og 19:20. Når to pumper går samtidig med at Brattørbrua ikke går, leveres det til sammenligning over 100 l/s.

Trykket på hovedtrykkledningen i stasjonen har sin største verdi, ca. 26 mVs, når begge pumpene går. Denne høye verdien blir opprettholdt når det også går en pumpe på Brattørbrua pumpestasjon. Trykket varierer mye rett etter pumpestopp. Når det ikke pumpes fra stasjonen ligger trykket på rundt 14mVs,

men stasjonære verdier finnes helt ned til ca. 10 mVs.

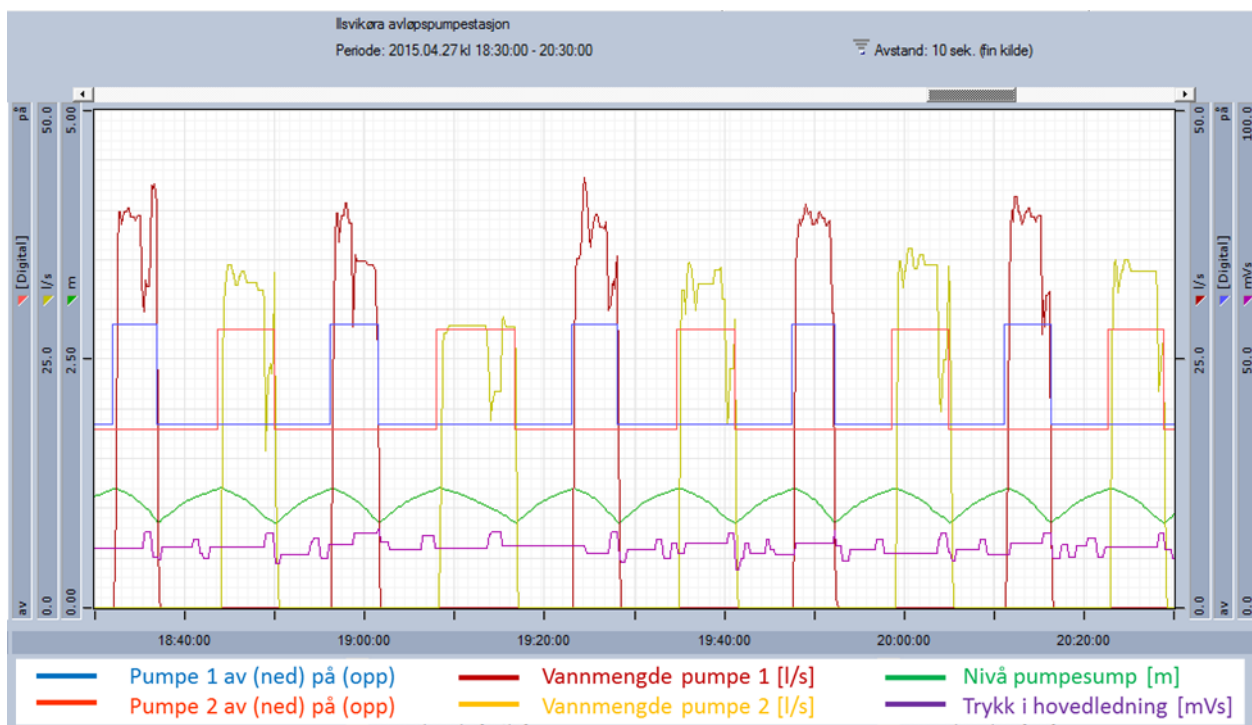


Figur 52 Lillegata pumpe-stasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30

Figur 52 viser målingene fra Lillegata pumpe-stasjon. Pumpene går alternerende for det aktuelle tidsintervallet. Pumpe 1 har en start/stoppfrekvens på litt over 20 minutter og har en varighet på omtrent 4 minutter. Pumpe 2 har en start/stoppfrekvens på omtrent 20 minutter og har en varighet på 3 minutter. Unntaket er fra klokken 18:59 til 19:30 når Pumpe 2 har en varighet på 31 minutter. Grunnen til dette er av vannmengdene forhindres på grunn av samtidig pumping fra Brattørbrua pumpe-stasjon, som går fra 18:58 til 19:24. Etter dette øker vannmengdene fra pumpe 1 på Lillegata betraktelig. Nedgang klokken 19:27 skyldes at begge pumpene på Frostakaia begynner å kjøre. Vannmengdene som pumpes fra pumpe 2 er normalt like over 35 l/s, mens det normalt er i underkant av 30 l/s som pumpes fra pumpe 1. Vannmengdene som pumpes varierer mye innen hver pumpesekvens, og samtidig pumping fra Brattørbrua og Frostakaia hindrer i stor grad effektiv pumping fra Lillegata.

Pumpene starter når nivået i pumpe-sumpen er på 1 meter, og stopper når nivået i pumpe-sumpen er på 0,7 meter.

Trykket på hovedtrykkledningen er i stor grad påvirket av de andre stasjonene. De høyeste toppene i trykket ligger på 25 mVs og forekommer når pumpene på Frostakaia pumpe-stasjon pumper. Når Frostakaia pumpe-stasjon pumper, ligger det stasjonære trykket på 14 til 16 mVs. De laveste stasjonære verdiene til trykket ligger på like over 11 mVs.



Figur 53 Ilsvikøra pumpestasjon 27. april 2015 klokken 18:30 til 20:30

På Ilsvikøra pumpestasjon, Figur 53, går pumpene alternerende for det aktuelle tidsintervallet. Hver av pumpene har en start/stoppfrekvens på litt over 24 minutter og en varighet på omtrent 5 til 6 minutter. Dette innebærer at en Pumpe starter omtrent hvert 12 minutt med en varighet på 5 til 6 minutter.

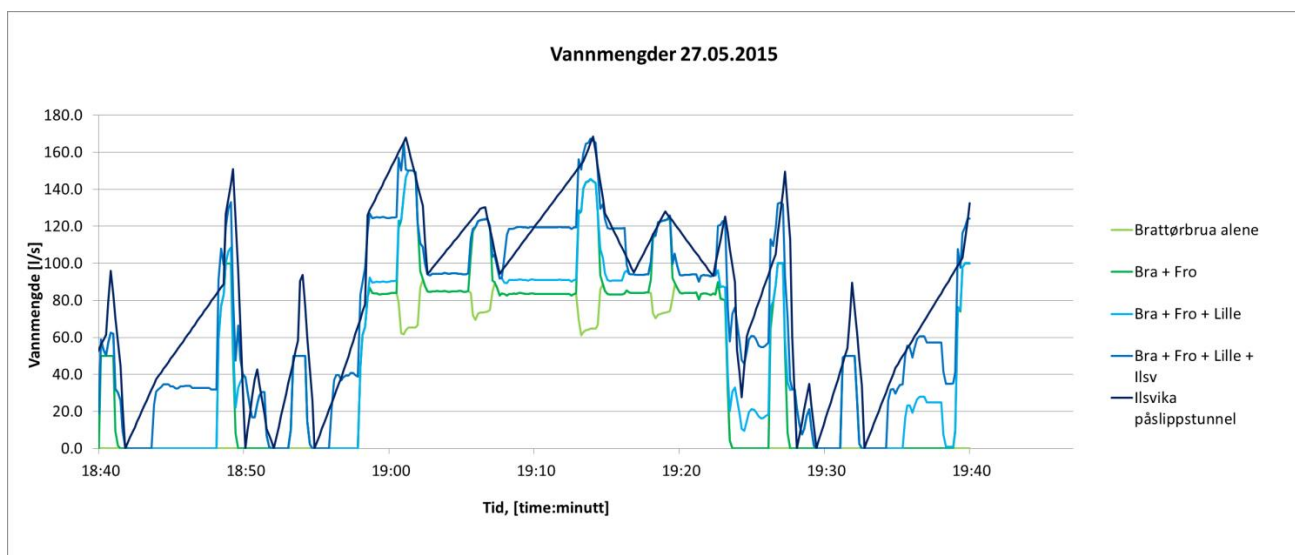
Pumpene starter når nivået i pumpesumpen er på 1,20 meter og stopper når nivået i pumpesumpen er 0,85 meter.

Vannmengdene som pumpes fra Pumpe 1 har høyeste stasjonære nivå på like under 40 l/s med variasjoner ned til 30 l/s. Det pumpes i overkant av 30 l/s fra Pumpe 2 med variasjoner ned til 20 l/s. Disse variasjonene er en konsekvens av at en eller begge pumpene i Frostakaia begynner å gå. Fra klokken 19:08 til 19:17 pumpes det lavere vannmengder enn normalt på grunn av at det pumpes vann fra Brattørbrua pumpestasjon.

Trykket på hovedtrykkledningen blir i særlig stor grad påvirket av pumping fra Frostakaia pumpestasjon. De høyeste verdiene for trykket er like over 15 mVs, og disse toppene forekommer når pumpene på Frostakaia pumpestasjon pumper. De laveste verdiene for trykket er rundt 8 mVs.

De laveste stasjonære verdiene til trykket ligger stabilt på litt under 11 mVs. Måleren ligger på kote 2,85 meter, og det laveste stasjonære hydrauliske potensialet i forhold til kote 0 er dermed 13,85 mVs. Når det pumpes vannmengder fra stasjonen ligger trykket stabilt like over 12 mVs. Trykket på hovedtrykkledningen i Ilsvikøra pumpestasjon opptrer helhetlig veldig stabilt og forutsigbart. Dette kan muligens sees i sammenheng med den store kapasiteten i siste del av trykkledningen.

5.1.2 Sammenstillinger av målinger fra flere stasjoner

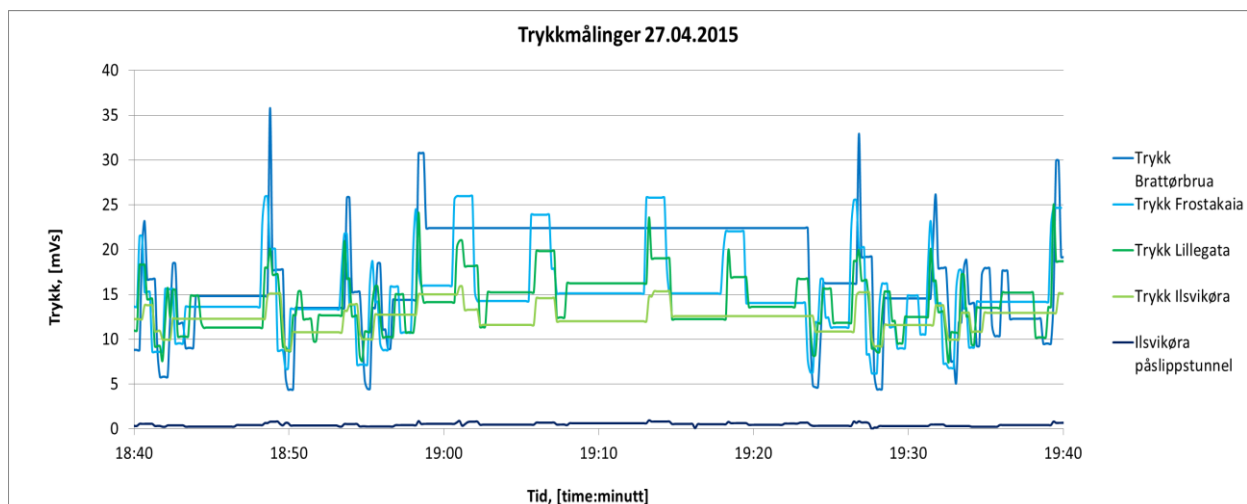


Figur 54 Målte vannmengder 27. april fra klokken 18:40 til 19:40. Akkumulerte vannmengder langs ledningen sammenliknet med Ilsvikøra påslippstunnel

Figur 54 viser vannmengder på de ulike strekningene i ledningen beregnet ved å legge sammen samtidig målte vannmengder pumpet inn fra de ulike stasjonene. Det er ikke tatt hensyn til transiente forhold med vann inn og ut av trykkluftstankene. Den grafen med lavest vannføring er vannmengden fra pumpene på Brattørbrua pumpestasjon, vist i lysegrønt. Like over ligger den grønne grafen for vannmengdene fra Brattørbrua og Frostakaia. Den lyseblå grafen består av adderte vannmengder fra pumpene fra Lillegata pumpestasjon, Brattørbrua og Frostakaia pumpestasjoner. Den blå grafen som ligger nest øverst inkluderer vannmengdene fra alle de fire pumpestasjonene. Den øverste kurven med mørkeblå farge er vannføringene målt i Ilsvika tunnel.

Ved å sammenligne målingene fra Ilsvikøra påslippstunnel og kurven for vannmengdene fra alle stasjonene ser en at toppene samstemmer godt. Det er likevel et stort avvik mellom målingen i Ilsvika påslippstunnel som viser større vannmengder enn den adderte vannmengden fra alle fire stasjonene. Dette avviket kan skyldes at ikke alle vannmengdene fra de fire stasjonene blir registrert. Målingene av vannmengder fra pumpene på Frostakaia havner dels utenfor målområdet. Dette vil være med på å underestimere mengden vann som pumpes fra stasjonen. Komprimering av luft eller fylling av tom ledning i siste del mot tunnel kan også være med å bidra til et avvik, men trolig i mindre grad.

Trykket i hovedtrykkledningen målt i de fire målestasjonene og på Ilsvika påslippstunnel 27. april klokken 18:40 til 19:40 er vist i Figur 55. Trykket i Brattørbrua pumpestasjon har de høyeste toppene og laveste bunnene. Det nest høyeste trykket er i Frostakaia pumpestasjon, men når pumpene både på Frostakaia og Brattørbrua pumpestasjoner kjører, har stasjonen de høyeste verdiene. Etter dette følger trykket i Lillegata pumpestasjon og trykket Ilsvikøra pumpestasjon. Trykket i Ilsvika påslippstunnel, som er målt like før vannet når Høvringen avløpstunnel, har som forventet lave verdier fra like over 0 til 1 meter.



Figur 55 Trykkmålinger 27. april 2015 fra klokken 18:40 til 19:40

5.2 Testkjøring med full kapasitet

For å se på et stasjonært tilfelle var det sterkt ønskelig å kjøre hovedtrykkledningen med full kapasitet. På forespørsel tilbød pumpegrappa å kjøre pumpene med full kapasitet den 12. mai 2015. Pumpene på de fire stasjonene ble avskrudd rundt klokken 08:00 for å samle opp vann i pumpeumpene, slik at pumpene kunne kjøres for fullt. Pumpene i alle stasjonene ble skrudd på samtidig ved at fire personer fra pumpegrappa var i hver av de fire stasjonene ca. klokken 10:35. Resultater er vist i det følgende.

5.2.1 Analyse av data fra hver pumpestasjon

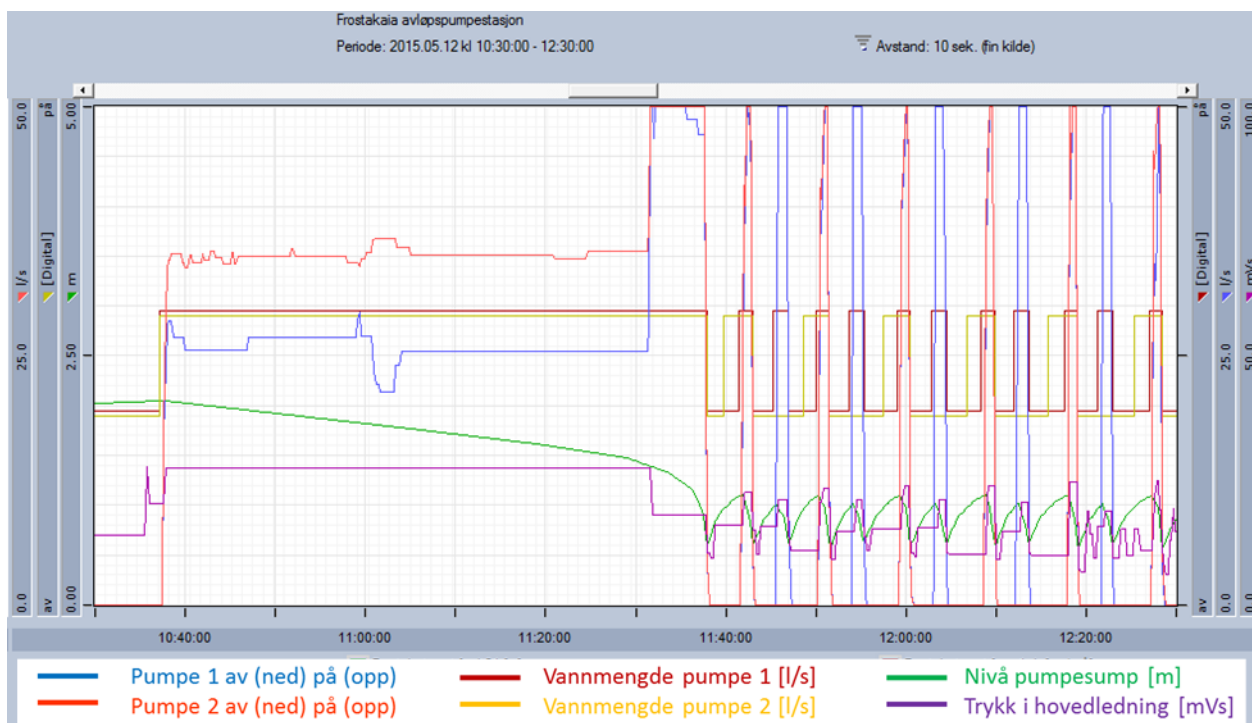


Figur 56 Brattørbrua pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30

Målingene for full kapasitet fra Brattørbrua pumpestasjon for perioden 10:30 til 12:30 er vist i Figur 56. Begge pumpene ble skrudd på klokken 10:35:10 og skrudde seg automatisk av klokken 11:31:30, når

nivået i pumpeumpen var på 0,69 meter. Ved oppstart øker vannmengden raskt til ca. 55 l/s for begge pumpene. Etter noen minutter stabiliserer vannmengden seg for begge pumpene, hvor pumpe 1 pumper rundt 43 l/s mens pumpe 2 pumper rundt 46 l/s. Denne stabile situasjonen vedvarer fram til pumpestopp.

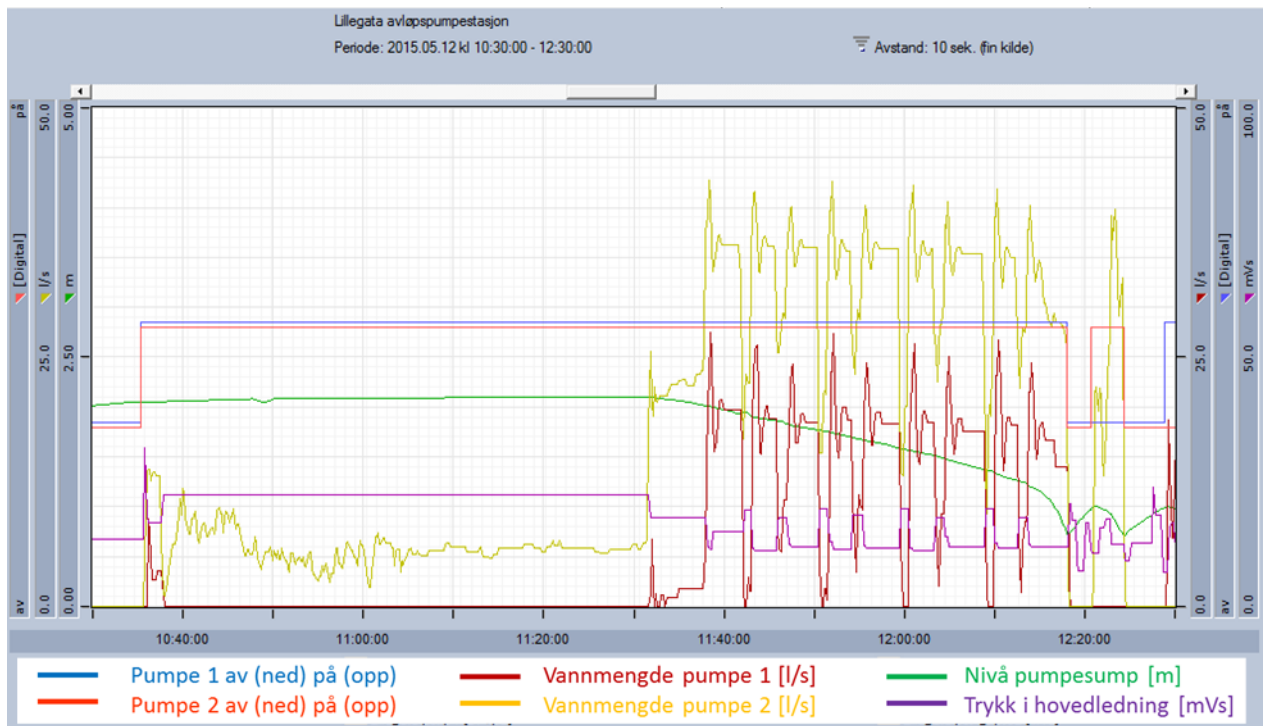
Trykket i hovedtrykkledningen på Brattørbrua pumpestasjon ligger før pumpestart stabilt på 14,5 mVs. I det pumpene starter øker trykket til 35,6 mVs hvor det ligger stabilt igjennom hele pumpekjøringen. Ved pumpestart faller trykket før det stabiliseres på 21 mVs. Etter dette blir trykket systematisk påvirket av pumpene på Frostakaia pumpestasjon.



Figur 57 Frostakaia pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30

På Frostakaia pumpestasjon ble pumpene startet klokken 10:37:10. Resultater fra Frostakaia for testkjøringen er vist i Figur 57. Vannmengden er rundt 25,5 l/s for pumpe 1 og rundt 35,0 for pumpe 2 men varierer noe. Når pumpene stanser på Brattørbrua klokken 11:31:30 øker vannmengdene for begge pumpene umiddelbart. Pumpene stanser klokken 11:37:40 når nivået i pumpeumpen er på 0,6 meter. Etter dette begynner pumpene på Frostakaia med en mer normal pumpecyklus.

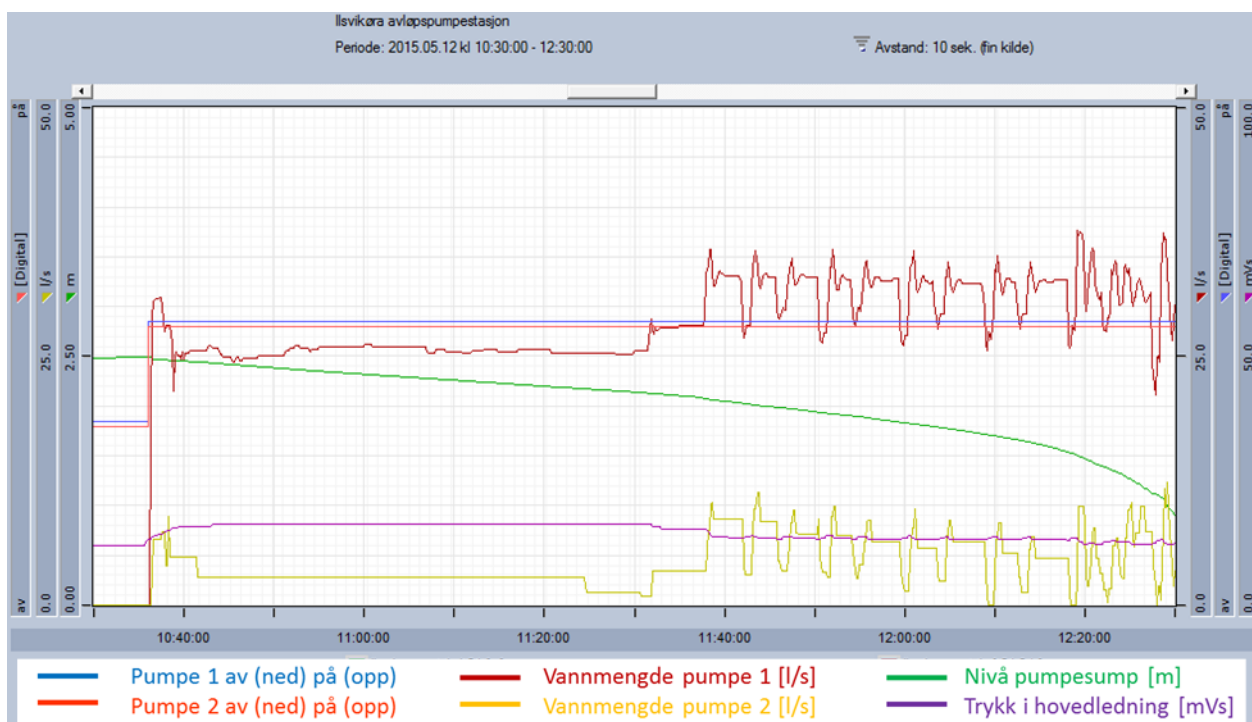
Trykket på hovedtrykkledningen på Frostakaia pumpestasjon ligger før pumpestart stabilt på 14,0 mVs. Etter at pumpene på Frostakaia begynner å gå ligger trykket stabilt på 27,5 mVs, helt til pumpene på Brattørbrua stanser og trykket faller til 18,2 mVs. Når pumpene på Frostakaia også stanser, faller trykket ytterligere ned til 9,5 mVs. Trykket påvirkes videre av om pumpene på Brattørbrua er av eller på.



Figur 58 Lillegata pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30

Resultater for testkjøringen fra Lillegata pumpestasjon er vist ved Figur 58. Oppstarten til pumpene er klokken 10:35:20. Pumpe 1 har maksimal vannmengde på 8,7 l/s, men slutter helt å pumpe etter at pumpene på Frostakaia starter opp. Vannføringer fra pumpe 2 er rundt 5 l/s i samme periode og har en tendens til å variere i takt med vannføringen fra Frostakaia. Når pumpene på Brattørbrua stanser, øker pumpet vannmengde fra Lillegata pumpestasjon. Vannmengdene øker ytterligere klokken 11:38 som er like etter at pumpene på Frostakaia har stanset. Etter dette avtar vannmengdene fra pumpene gjentatte ganger samstemmende med at det pumpes fra Frostakaia pumpestasjon. Pumpene på Lillegata pumpestasjon slutter først å gå klokken 12:18 når nivået i pumpesumpen er på 0,7 meter.

Trykket på hovedtrykkledningen Lillegata pumpestasjon ligger på 13,5 mVs før pumpene på stasjonene begynner å gå. Trykket stabiliseres etter oppstart til et trykk på 22,3 mVs. Dette stabile trykket varer helt til pumpene på Brattørbrua pumpestasjon slutter å gå, noe som resulterer i at trykket synker til 17,8 mVs. Trykket synker ytterligere til 15,1 mVs når pumpene på Frostakaia stanser. Etter dette øker trykket hver gang det pumpes fra Frostakaia pumpestasjon.



Figur 59 Ilsvikøra pumpestasjon 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30

Resultater for testkjøringen fra Ilsvikøra pumpestasjon er vist i Figur 60. På Ilsvikøra pumpestasjon ble pumpene startet klokken 10:36:00.

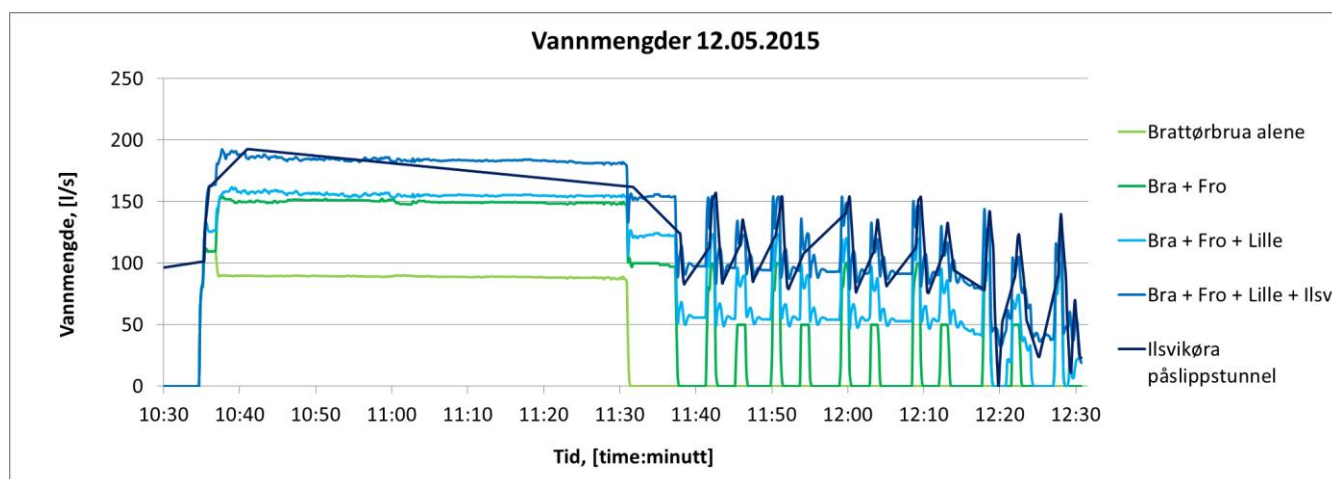
Vannmengdene fra pumpe 1 stabiliseres på litt over 25 l/s mens vannmengdene fra pumpe 2 stabiliseres på 2,9 l/s. Dette indikerer at pumpe 2 fungerer dårlig. I starten har vannføringen fra de to pumpene topper som skyldes at pumpene på Frostakaia ikke har begynt å kjøre. Vannmengdene i begge pumpene har en liten økning når pumpene på Brattørbrua slutter å pumpe klokken 11:31:30, og øker ytterligere etter at pumpene på Frostakaia slutter å pumpe klokken 11:37:40.

Registreringene fra Ilsvikøra pumpestasjon ligner i prinsipp mye på registreringen fra Lillegata pumpestasjon i samme tidsintervall. Dette vil si at vannmengdene avtar gjentatte ganger samstemmende med at det pumpes fra Frostakaia pumpestasjon.

Pumpene på Ilsvikøra pumpestasjon slutter først å gå klokken 12:30:20 når nivået i pumpesumpen er 0,86 meter.

Før pumpestart ligger trykket i hovedledningen på Ilsvikøra pumpestasjon på 11,9 mVs. Ved pumpestart øker trykket gradvis opp til 16,2 mVs. Trykket synker gradvis etter at pumpene på Brattørbrua pumpestasjon slutter å gå. En kan også se at trykket synker ytterligere etter at pumpene på Frostakaia slutter å gå. Det er ikke veldig store variasjoner i trykket etter dette, men en kan se tendensen til at trykket går opp i det pumpene på Frostakaia pumpestasjon går.

5.2.2 Sammenstillinger av målinger fra flere stasjoner



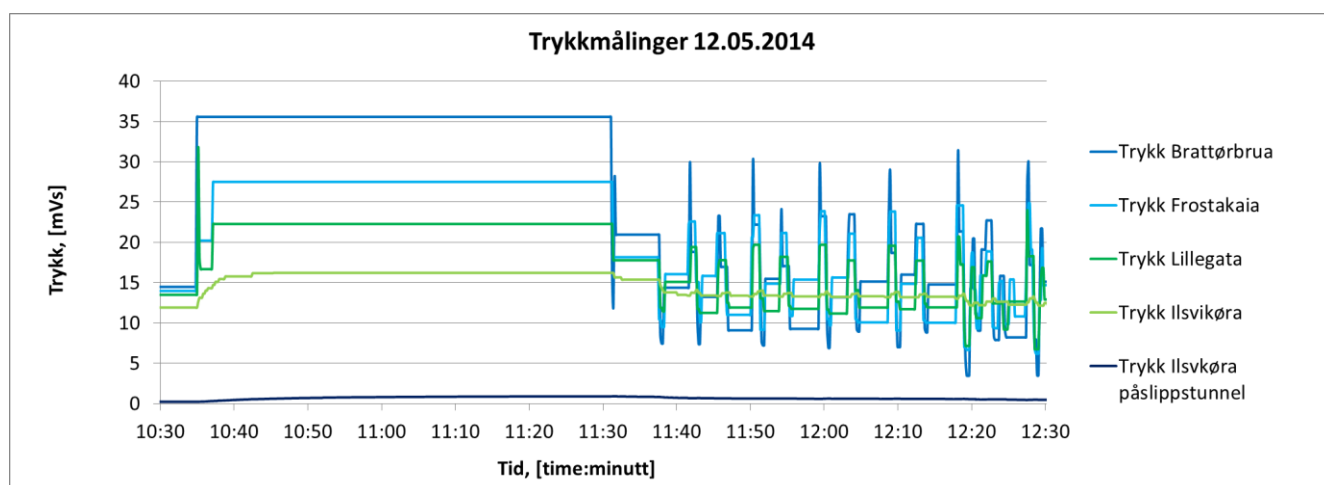
Figur 60 Målte vannmengder 12. mai 2015 klokken 10:30 til 12:30

Figur 60 viser vannmengdene langs ledningen for pumpetesten 12. mai 2015. Den blå grafen som hovedsakelig ligger nest øverst inkluderer vannmengdene fra alle de fire pumpestasjonene. Den mørkeblå kurven er vannføringene målt i Ilsvika tunnel og ligger hovedsakelig øverst av alle kurvene.

Sammenligning av målingene fra Ilsvika påslippstunnel og kurven for vannmengdene fra alle stasjonene samstemmer relativt godt når alle pumpene går. Det er likevel underlig at vannmengdene i Ilsvikøra påslippstunnel synker jevnt fra ca. 10:40 til 11:30 mens pumpede vannmengder ser ut til å være konstant. Årsaken til dette er ukjent.

I løpet av de 50 minuttene mellom klokken 10:40 til 11:30 er vannmengden ut i Ilsvikøra påslippstunnel ca. $180 \text{ l/s} \times 60 \text{ s} \times 50 \text{ min} = 540 \text{ m}^3$. Trykkluftstankene har et volum på 5 m^3 . En ser at vann inn og ut av trykkluftstankene ikke kan forklare forskjellen mellom vann ut i tunnelen og vann pumpet inn i ledningen.

Det kan være interessant å merke seg at trykkledningen har et totalvolum på ca. 434 m^3 , noe som tilsier at det skal pumpes med stor intensitet relativt lenge for å bytte ut alt vannet i ledningen, jamfør det målte vannvolumet på 540 m^3 som pumpes ut av ledningen på 50 minutter når alle pumper er på.



Figur 61 Trykkmålinger 12. mai 2015 fra klokken 10:30 til 12:30

Trykket i hovedtrykkledningen målt i de fire målestasjonene og på Ilsvika påslippstunnel den 12. mai klokken 10:30 til 12:30 er vist i Figur 61. Brattørbrua pumpestasjon har det høyeste trykket når systemet går for full kapasitet. Stasjonærverdiene for trykket er gitt i Tabell 13. Disse verdiene er benyttet for sammenligning med beregninger utført med falltapsmodell for stasjonær tilstand.

Etter at pumpene på Brattørbrua har sluttet å gå har trykket på Brattørbrua pumpestasjon de høyeste toppene og laveste bunnene slik som ved normal drift. Det nest høyeste trykket både når alle pumpene går og i toppene er i Frostakaia pumpestasjon. Trykket på Lillegata og Ilsvikøra har henholdsvis det tredje og fjerde største trykket både ved full pumpekjøring og i toppene i ettertid. Svingningene i de målte trykkene i de pumpene på Brattørbrua stanser og pumpene på Frostakaia stanser 6 minutter senere, er benyttet til sammenligning med HYTRAN- beregninger.

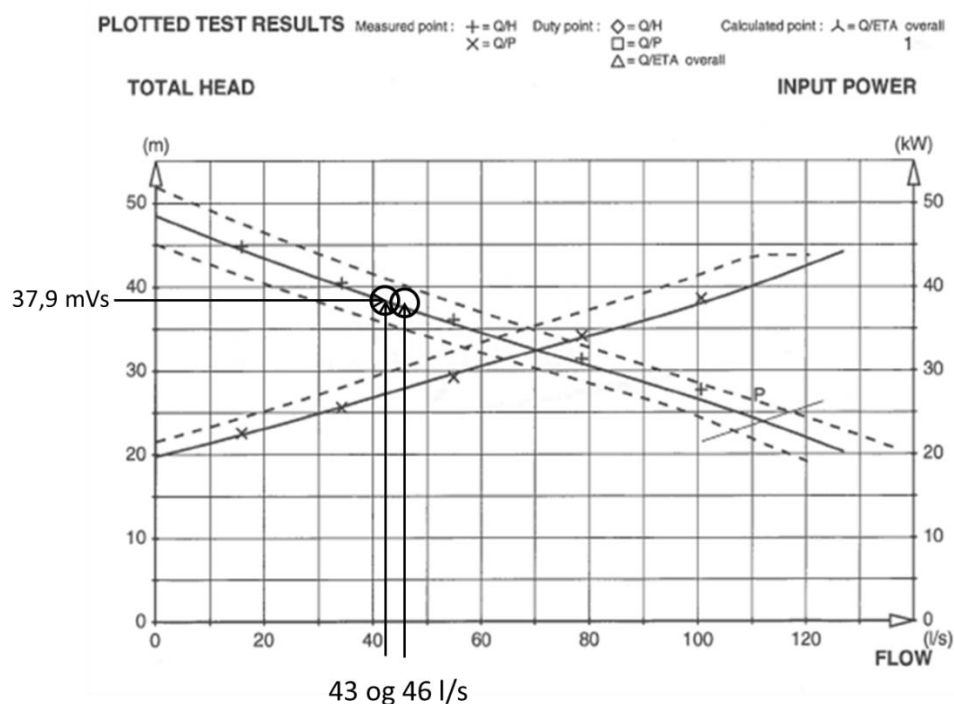
5.2.3 Vurdering av målinger opp mot pumpekarakteristikker

Det er interessant å sammenholde målt vannmengde og målt trykk opp mot pumpekarakteristikkene for pumpene i stasjonene. «Head» i pumpene er beregnet ut fra målt trykk i hovedtrykkledningen ved å ta hensyn til forskjell i stedshøyde. Resultatet for stasjonært tilstanden i pumpe testen 12. mai 2015 er gitt i Tabell 12.

Tabell 12 Vannmengder og head i pumpene basert på målinger på hovedtrykkledningen

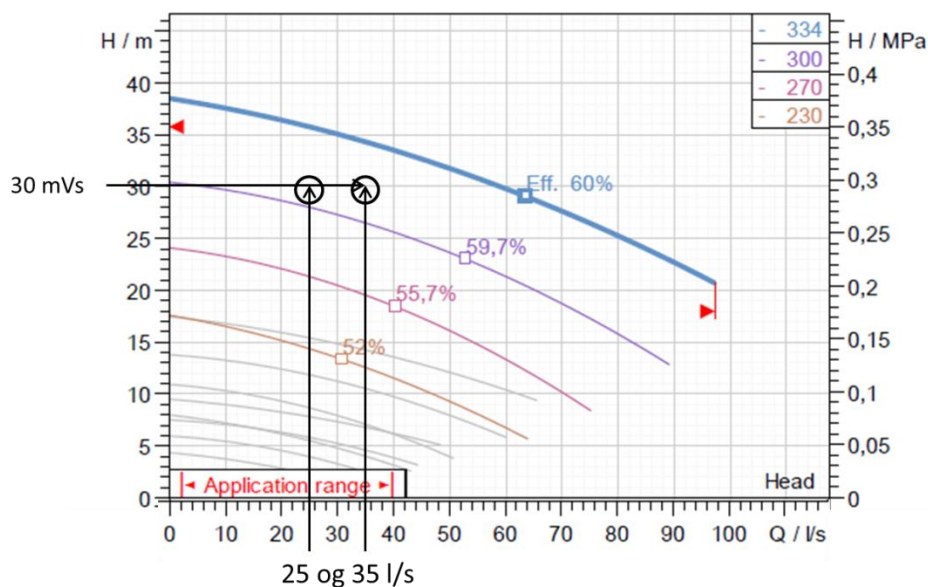
	Mengde vann pumpet i [l/s]		Nivå pumpe [m]	Head i Pumpe[mVs]
	Pumpe 1	Pumpe 2	m.o.h.	Pumpe 1 og 2
Brattørbrua	43	46	0,33	38,2-0,33=37,9
Frostakaia	25	35	0,33	30,3-0,33=30,0
Lillegata	0	6	0,48	25,1-0,48= 24,6
Ilsvikøra	25	3	-0,31	18,5-(-0,31)=18,8

Vannmengder og tilhørende trykk er lagt inn i pumpekarakteristikkene ved piler som definerer faktisk driftspunkt for den stasjonære tilstanden som er oppnådd under testen.



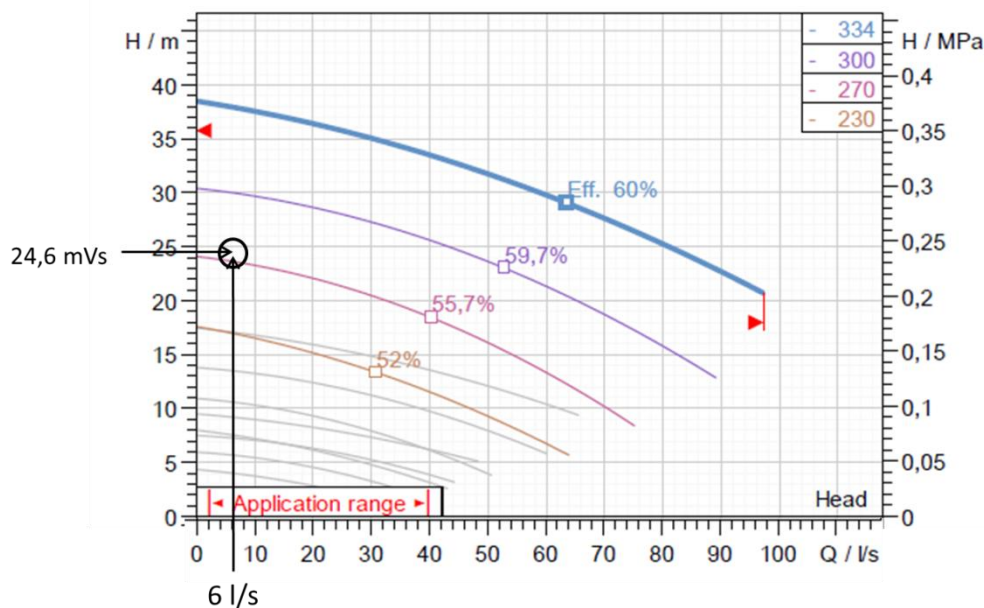
Figur 62 Faktisk driftspunkt for Brattørbrua. «Head» og vannmengde vist i pumpekarakteristikk

Brattørbrua pumpestasjon har et faktisk driftspunkt som er vist i Figur 62. Vannmengdene fra de to pumpene på Brattørbrua er på henholdsvis 43 l/s og 46 l/s. «Head» på 37,9 mVs viser det faktiske driftspunktet for den stasjonære tilstanden som samstemmer godt med pumpekarakteristikken for Flygt pumpen. Brattørbrua har de nyeste pumpene og pumpekarakteristikken kommer fra test rett før levering. Det faktum at pumpenes vannmengder på 43 og 46 l/s med head fra målt trykk på 37,9 mVs gir et punkt samfallende med pumpekarakteristikken, gir tiltro til de nye trykkmålingene. Dette indikerer at det beregnede falltapet er for lite mens det målte er korrekt og styrker teorien om sedimenter i ledningen.



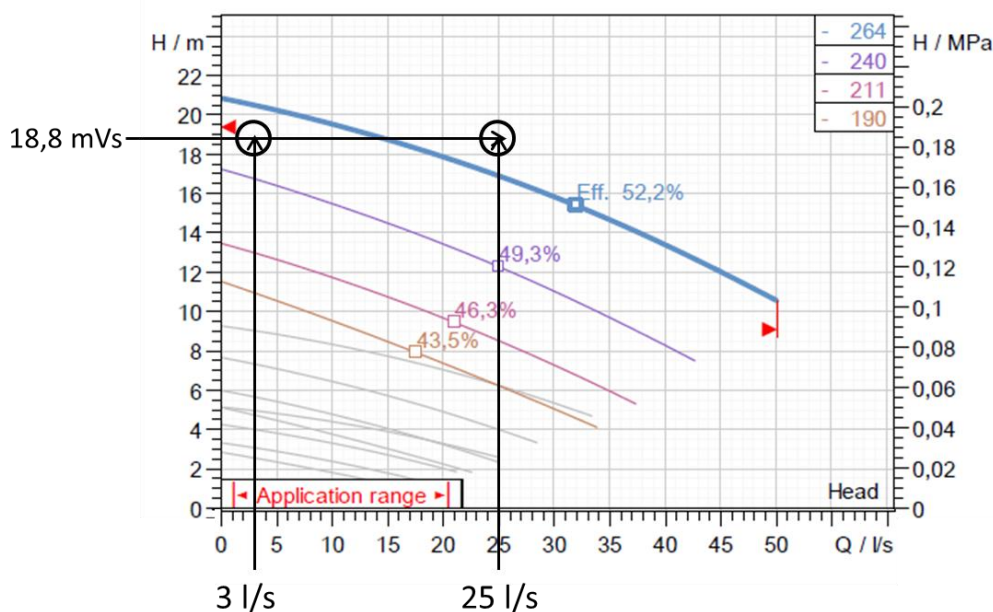
Figur 63 Faktisk driftspunkt for Frostakaia. «Head» og vannmengdevist i pumpekarakteristikk

Frostakaia pumpestasjon har et faktisk driftspunkt som er vist i Figur 63. Vannmengdene fra de to pumpene på Frostakaia er på henholdsvis 25 l/s og 35 l/s. «Head» på 30 mVs viser det faktiske driftspunktet for den stasjonære tilstanden som samstemmer godt med pumpekarakteristikken for ABS/Sulzer FB 100/100 for en effektivitet mellom 59,7 og 60 %.



Figur 64 Faktisk driftspunkt for Lillegata. «Head» og vannmengdevist i pumpekarakteristikk

Lillegata pumpestasjon har et faktisk driftspunkt som er vist i Figur 64. Vannmengdene fra de to pumpene på Lillegata er på henholdsvis 6 l/s og 0 l/s. Dette innebærer at den ene pumpen ikke makter å levere vann mens den andre leverer svært lite. Stasjonen makter ikke å levere vann mot «Head» på 24,6 mVs. En ser fra pumpekarakteristikken for disse pumpene av typen ABS/Sulzer FB 100/100 at en skulle forvente at de klarte å levere mer vann. Pumpene er trolig ikke i topp stand.



Figur 65 Faktisk driftspunkt for IISVIKØRA. «Head» og vannmengdevist i pumpekarakteristikk

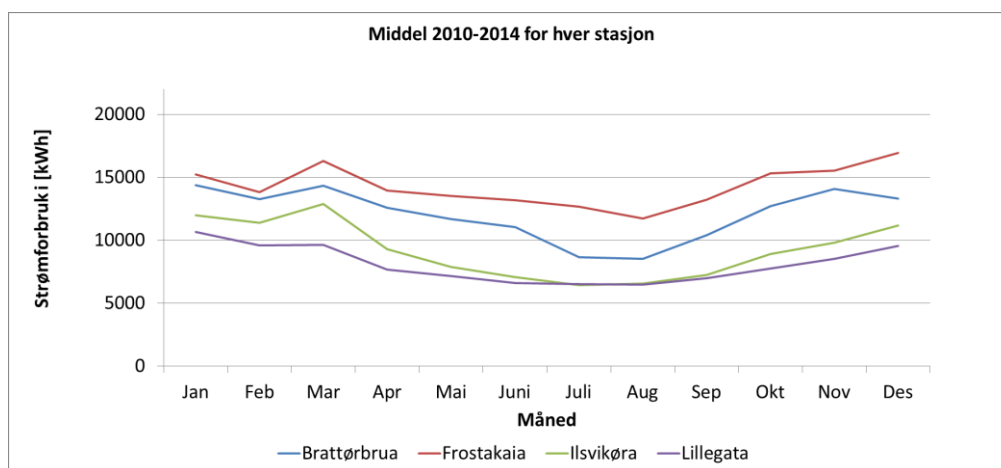
IISVIKØRA pumpestasjon har et faktisk driftspunkt som er vist i Figur 64. Vannmengdene fra de to pumpene på IISVIKØRA er på henholdsvis 3 l/s og 25 l/s. «Head» er 18,8 mVs og for ABS/Sulzer FB 80/80 tilsvarer dette en effektivitet på over 52,2 % for den ene pumpen, noe som ligger over forventet effektivitet. Den andre pumpen fungerer dårlig og pumper kun 3 l/s og makter ikke å levere for 18,8 mVs.

5.3 Strømforbruk

Det finnes ikke registreringer i EAdata på strømforbruk for pumpene ved de aktuelle stasjonene, selv om det er lagt opp til at slike registreringer skal være mulig.

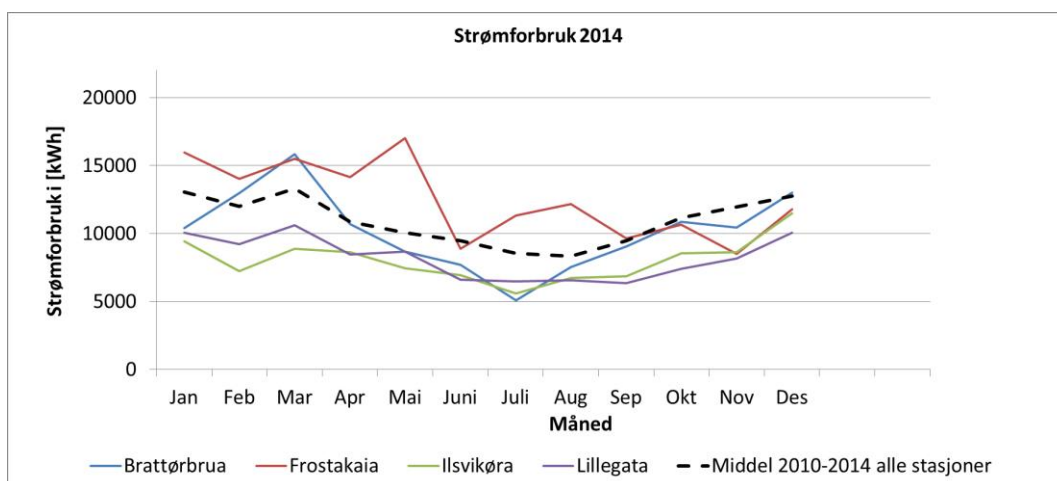
Det er imidlertid framskaffet tallmateriale for totalt strømforbruk på de aktuelle stasjonene for hver måned i årene 2010 til 2014. Energiforbruket for hver stasjon inkluderer hele stasjonen og gir ingen opplysninger om hvor mye som går til hver av pumpene og hvor mye som går til belysning, oppvarming og vifter for ventilasjon.

Andelen av energien som går til selve pumpene er avhengige av størrelsen til pumpestasjonen og antall driftstimer pumpene har. De små stasjonene der hvor pumpene går sjelden, vil energiforbruket til vifter, varme og lys, være større i prosent enn på en stasjon med store pumper som kjører ofte (Mellemsæther, 2015). Midlere forbruk per måned for stasjonene fra 2010 til 2014 er vist i Figur 66.



Figur 66 Energiforbruk middel 2010 – 2014 for hver stasjon

Pumpene på Brattørbrua ble skiftet desember 2013. Det kan derfor være noe misvisende å se på historiske strømforbruk fra 2010 til 2014. Data for 2014 alene er vist i Figur 67. Variasjonen over året er trolig primært knyttet til den andelen energi som går til oppvarming.



Figur 67 Strømforbruk i stasjonene i 2014

I følge Tabell 5 ble det levert $2\,428\,076\text{ m}^3$ vann via pumpeledningen til rensanlegget i 2004. Dersom en antar tallet kan benyttes for størrelsesorden på levert vann også i 2014, kan en regne litt på teoretisk energibehov for å pumpe denne vannmengden opp til ca. 20 meters nivå og sammenligne dette med strømforbruket. Høyden på 20 meter er valgt som et anslag på løftehøyde 13,5 meter pluss tap.

Med virkningsgrad 60 % kan den teoretiske, nødvendige energimengden estimeres til:

$$\begin{aligned}
 E_{teor} &= mgh/0,6 = 2,4 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 20 \text{ m} / 0,6 \\
 &= 4,8 \cdot 10^{11} \text{ Js} / 0,6 = 2,2 \cdot 10^5 \text{ kWh}
 \end{aligned}
 \tag{Lign. 23}$$

Med utgangspunkt i Figur 67 har en et midlere, målt strømforbruk for 2014 på en stasjon ca. lik 11000 kWh per måned. Gjennom et år og for alle fire stasjonene har en da et strømforbruk for hele 2014 på $11000 \text{ kWh} \cdot 4 \text{ stasjoner} \cdot 12 \text{ måneder} = 5,3 \cdot 10^5 \text{ kWh}$.

Beregningen viser at noe under halvparten av strømforbruket i stasjonene trolig går til pumpene.

6 SIMULERINGER MED FALLTAPSMODELL FOR STASJONÆR STRØMNING

Dette kapitlet omhandler resultater av beregninger gjort i falltapsmodellen for stasjonær strømning og sammenligning med målinger. Falltapsmodellen er utviklet i forbindelse med dette arbeidet som et regneark basert på teori presentert i kapittel 2 og beregningsmetodikk beskrevet i kapittel 3.2.

De viste simuleringene i dette kapitlet er basert på målte vannmengder fra testkjøring 12. mai 2015. Simuleringene gir det hydrauliske potensialet og dermed forventet trykk i ledningen. Beregnet trykk er sammenlignet med målt trykk i stasjonene.

6.1 Hydraulisk potensial, beregnet og målt energilinje langs hovedledningen

Beregningene av hydraulisk potensial langs trykkledningen tar utgangspunkt i høydenivået på Ilsvika påslippstunnel som er anslått til 13,5 meter. Trykket ved utløpet antas å være lik 0. Hastigheten er normalt mindre enn 1 m/s i hovedtrykkledningen, noe som innebærer at hastighetshøyden maksimalt er ca. 0,05 meter langs ledningen og kan neglisjeres. Dette betyr at potensialet ved utløpet er gitt å være 13,5 meter.

Modellen adderer tap etter Darcy- Weisbachs ligning og singulærtap i bend og tilbakeslagsventiler. Den regner sekvensielt potensialet (eller energilinjen) langs ledningen fra Ilsvika påslippstunnel via pumpestasjonene Ilsvikøra, Lillegata og Frostakaia. Beregningene gir til slutt hydraulisk potensial på pumpene og trykkmåleren ved Brattørbrua.

Pumpede vannmengder er input til modellen. Ved å kjøre alle pumpene kontinuerlig i en pumpe-test gjennomført 12. mai 2015 fikk en etablert en dokumenterbar og svært stabil stasjonær tilstand. Vannmengdene som ble pumpet under pumpe-testen, var konstante i ca. 50 minutter og er gitt i Tabell 13. Trykkmålerne viste etter en kort transient på noen få minutter konstante trykkverdier.

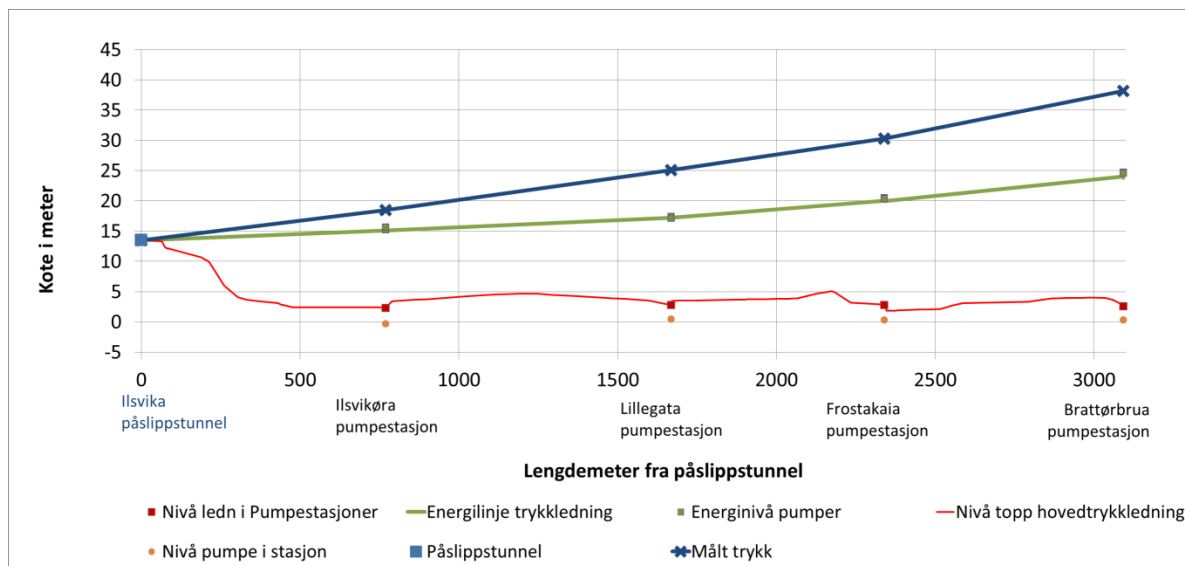
De målte vannmengdene som ble levert fra pumpene under testkjøringen 12. mai, ble brukt som input i falltapsmodellen (regnearket). Utsnitt fra selve regnearket er vist i Figur 24 og Figur 25 i seksjon 3.2 for å dokumentere beregningsmetoden, men figurene viser tall som gjelder for den stasjonærtilstanden som vurderes her i kapittel 6. I det følgende presenteres beregningsresultatene sammenlignet med trykkmålinger på ledningen.

Trykket i ledningen og ved pumpene kan beregnes fra potensialet ved bruk av Bernoullis ligning. Potensialet består av trykkehøyde, stedshøyde og hastighetshøyde. Hastighetshøyden betyr mye siden hastighetene i hovedtrykkledningen er i størrelsesorden 1 m/s, mens hastigheten i tilkoblingsrørene fra pumpene er i størrelsesorden 2 m/s. Hastighetshøyden er derfor maksimalt lik 5 cm i hovedtrykkledningen og maksimalt lik 20 cm ved pumpene. Trykket langs ledningen i mVs er på basis av dette i praksis potensial minus stedshøyde. Stedshøyden er gitt med referanse null i det nye Trondheimskartet, innført 1. mars 2011.

Tabell 13 Målte vannmengder og målte trykk i ledningen ved testkjøring 12. mai 2015: Kolonnen «målt» potensial er målt trykk + ledningens kotehøyde i stasjonen (varierer +2,6 til +2,8m)

Stasjon	Målte vannmengder fra pumper (l/s)			Målt trykk i trykkledning mVs	«Målt» potensial ledning mVs
	Pumpe 1	Pumpe 2	Totalt		
Brattørbrua	43	46	89	35,6	38,2
Frostakaia	25	35	60	27,5	30,3
Lillegata	0	6	6	22,3	25,1
Ilsvikøra	25	3	28	16,2	18,5
Påslippstunnel			190 - 160	Anslått til 0	13,5

Energilinjen (potensial) gitt av falltapsmodellen er vist i Figur 68. Energilinjen er vist ved grønn linje, mens energilinje (potensial) basert på trykkmålingene er vist ved blå linje ut fra verdiene i Tabell 13. En ser at det er en betydelig forskjell mellom beregnet og målt potensial. Forskjellene er gitt i Tabell 14.



Figur 68 Resultat fra falltapsmodell og målinger. Beregnet trykk i grønt, målt trykk i blått

Tabell 14 Beregnet og «målt» potensial langs hovedtrykkledningen samt differanse i potensial som også er differanse i vanntrykk mellom målt og beregnet vanntrykk

Stasjon	Beregnet potensial mVs	«Målt» potensial mVs	Differanse i potensial = differanse i trykk mVs
Brattørbrua	23,8	38,2	14,4
Frostakaia	20,0	30,3	10,3
Lillegata	17,2	25,1	7,9
Ilsvikøra	15,1	18,5	3,4

Falltapsmodellen gir betydelig lavere tap langs hovedtrykkledningen enn målingene skulle tilsi. Innledende beregninger viste det samme og det er derfor i denne beregningen valgt så store tapsfaktorer som mulig innen erfaringsmessige intervaller. For tap i bend er $k_{90} = 0,5$ valgt mens ruheten $k = 0,6$. Disse er øvre verdier fra Tabell 6 og Tabell 7. Antall bend og vinkelen på disse er estimert ut fra detaljstudier av kart.

Med de valgte verdier for tap er det derfor vanskelig å forklare det store avviket mellom målt og beregnet trykk i hovedtrykkledningen. Vannet møter tydeligvis større strømningsmotstand enn falltapsmodellen basert på ordinær falltaps-teori skulle tilsi. Dette innebærer at det er naturlig å tenke seg at det enten er sedimenter eller luft i rørene, noe som hindrer strømmingen utover den en normalt kunne forvente.

Figur 68 indikerer at tapene er underestimert i falltapsmodellen for alle seksjonene sammenlignet med målingene. Forskjellene i beregnet og målt tap på seksjonene mellom pumpe-stasjonene er vist i Tabell 15. Verdiene viser at avviket er størst i trykkledningen mellom Lillegata og Ilsvikøra, og mellom Brattørbrua og Frostakaia. Dette kan antyde at disse seksjonene har mest sedimenter dersom dette er årsaken til avviket.

Avviket mellom målt og beregnet potensial på Brattørbrua, på 14,4 meter, er det mest bemerkelsesverdige funnet fra beregningene med falltapsmodellen for stasjonær strømming.

Tabell 15 Beregnet og «målt» tap for hver seksjon langs hovedtrykkledningen

Seksjon	Beregnet potensialforskjell	«Målt» potensialforskjell	Avvik mellom beregnet og målt tap
	mVs	mVs	mVs
Brattørbrua – Frostakaia	23,8 – 20,0 = 3,8	38,2 – 30,3 = 7,9	7,9 – 3,8 = 4,1
Frostakaia – Lillegata	20,0 – 17,2 = 2,8	30,3 – 25,1 = 5,2	5,2 – 2,8 = 2,4
Lillegata – Ilsvikøra	17,2 – 15,1 = 2,1	25,1 – 18,5 = 6,6	6,6 – 2,1 = 4,5
Ilsvikøra – Ilsvika påslipp	15,1 – 13,5 = 1,6	18,5 – 13,5 = 5,0	5,0 – 1,6 = 3,4

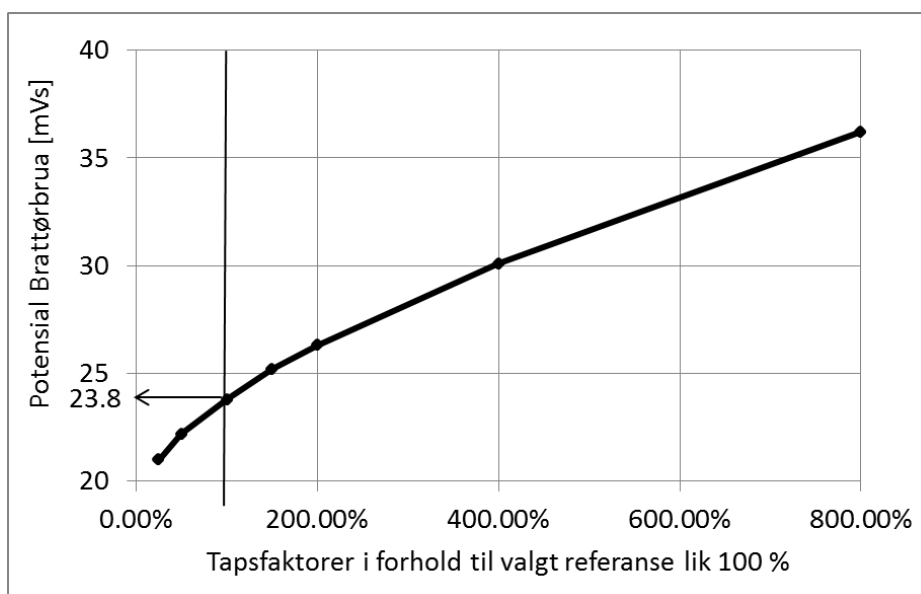
6.2 Sensitivitetsanalyse, friksjonstap og singulærtap

Beregningene med falltapsmodellen i seksjon 6.1 av stasjonærtilstanden 12. mai 2015 benytter ruheten $k = 0,6$ og singulærtapskoeffisient $k_{90} = 0,5$. Dette tilfelle er tatt som et referansetilfelle for en sensitivitetsanalyse. Verdiene, $k = 0,6$ og $k_{90} = 0,5$, er i øvre enden av det erfaringsmessige intervallet. De høye verdiene ble valgt siden målte trykk indikerte store tap og høyt potensial ved Brattørbrua.

Følsomheten i beregnet potensial for variasjon i tapskoeffisientene er vist i Figur 69. Referansetilfellet tilsvarer, som angitt tidligere, et potensial lik 23.8 mVs på Brattørbrua pumpestasjon og gjenfinnes i figuren for 100 % på horisontalaksen.

Sensitivitetsanalysen er utført ved å ta utgangspunkt i verdiene $k = 0,6$ og $k_{90} = 0,5$ og multiplisere disse verdiene med faktoren på horisontalaksen og så gjennomføre nye beregninger. Ved dobling av verdiene (200 %) får en 26,3 mVs. En må multiplisere med 8 (800 %) for å få et hydraulisk potensial på Brattørbrua lik 36,2 mVs. Målt trykk på Brattørbrua fra trykkmålingene pluss stedshøyden til ledningen gir til sammenligning et potensial på 38.2 mVs.

Sensitivitetsanalysen viser tydelig at det ikke er mulig å forklare avviket mellom målt og beregnet potensial på Brattørbrua pumpestasjon med normale ruheter og koeffisienter for tap i ledning og bend.



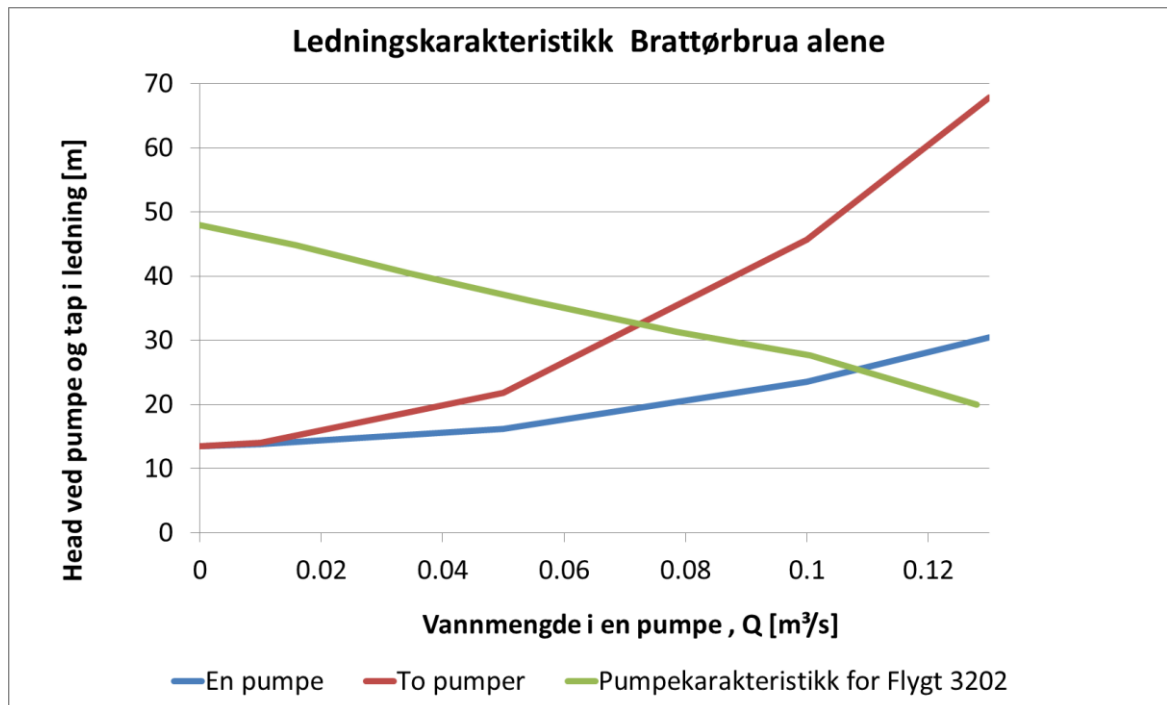
Figur 69 Potensial på Brattørbrua som funksjon av varierende tapsfaktorer

6.3 Beregnede ledningskarakteristikker

Falltapsmodellen for stasjonær strømning kan brukes til å beregne ledningskarakteristikker. Dette kan gjøres ved å ta utgangspunkt i en bestemt stasjon av gangen. Potensial i stasjonen kan beregnes for varierende spesifiserte vannmengder mens vannmengdene fra de andre stasjonene er konstante. En vil

da finne potensial eller nødvendig «head» ved pumpe mot økende vannmengde som følge av falltap videre fremover i ledningen mot utløpet. Dette gir en ledningskarakteristikk som er betinget av hvor mye som pumpes fra de andre stasjonene.

Figur 70 viser en beregnet ledningskarakteristikk for Brattørbrua når ingen andre stasjoner pumper vann inn på hovedtrykkledningen. Dette er gjort for både en og to pumper hvor økende vannmengde fra 0 til opp til 120 l/s er satt inn i falltapsmodellen. Denne ledningskarakteristikken stemmer bare når pumpene på de tre andre stasjonene ikke går, ettersom ledningskarakteristikkene i de fire stasjonene påvirker hverandre.



Figur 70 Ledningskarakteristikker Brattørbrua når ingen andre stasjoner pumper inn avløp inn på hovedtrykkledningen

7 SIMULERINGER MED DYNAMISK MODELL FOR TRANSIENT STRØMNING

Dette kapitlet omhandler resultater fra simuleringer gjort i en dynamisk modell for transient strømning, HYTRAN. Metodikken og programmet er beskrevet i seksjon 3.4 som også gir en oversikt over modellen som er laget av hovedtrykkledningen i Trondheim med pumpestasjoner. HYTRAN er i dette arbeidet brukt til å se på hvordan svingningene i systemet oppstår og utvikler seg når pumpene på Brattørbrua og Frostakaia pumpestasjoner blir skrudd av. For simuleringen ble det tatt utgangspunkt i testkjøring 12. mai 2015.

7.1 Input til HYTRAN

Simuleringene er basert på input gitt i Tabell 16 og Tabell 17. Data er formidlet av Trondheim kommune ved Asbjørn Mellemsæther (Mellemsæther, 2015).

Tabell 16 Inndata knyttet til ledningsseksjoner mellom stasjonene

	Brattørbrua- Frostakaia	Frostakaia- Lillegata	Lillegata- Ilsvikøra	Ilsvikøra- Ilsvika påslippstunnel
Lengde [m]	764	663	880	770
Diameter, D [mm]	315	400	450	500
Veggtykkelse [mm]	25	25	25	25
Materiale	Polyetylen	Polyetylen	Polyetylen	Polyetylen
Elastisitet [MPa]	0,9	0,9	0,9	0,9
Trykkbølgehast. [m/s]	262	233	220	209
Friksjonsfaktor DW	0,050	0,048	0,045	0,045
K faktor singulærtap	3	3	3	3
Vannmengde [m ³ /s]	0,09	0,15	0,156	0,184

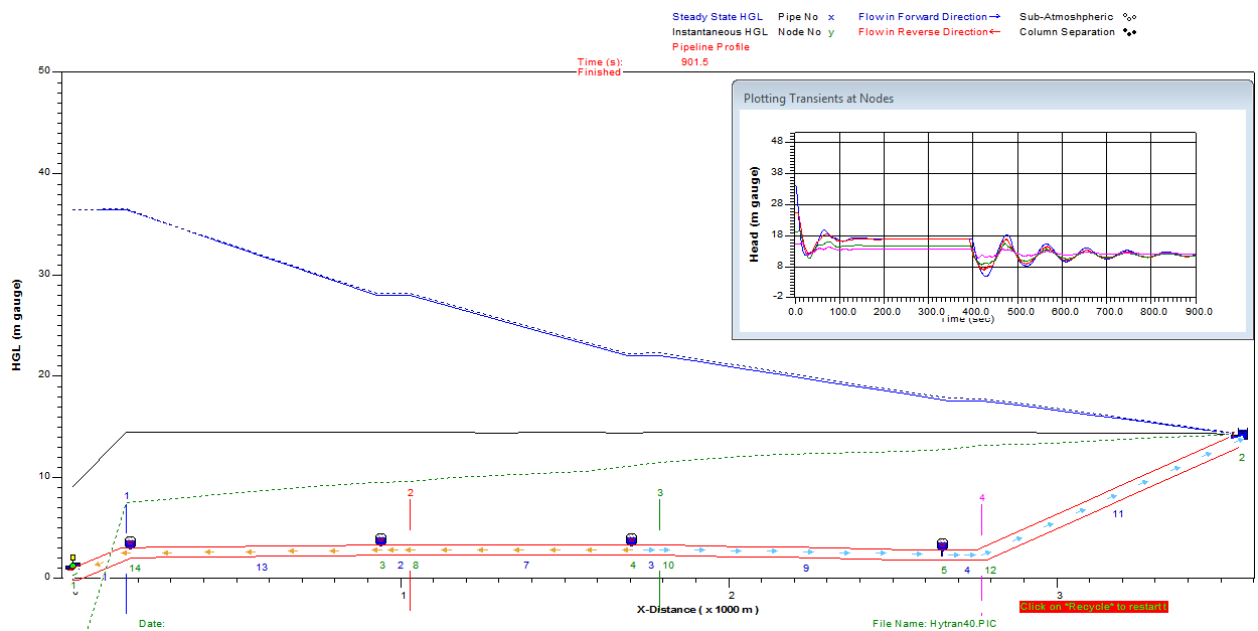
Tabell 17 Inndata knyttet til pumper (øverst i tabell) og trykkluftstanker på stasjonene (nederst i tabell)

	Brattørbrua	Frostakaia	Lillegata	Ilsvikøra
Antall pumper	2	2	1	1
Vannmengde en pumpe [m ³ /s]	0,045	0,03	0,006	0,028
Head pumpe [mVs]	35,6	27,5	22,3	16,2
Pumpehastighet [rpm]	1500	1470	1470	1470
Effektivitet pumpe %	60	59,8	55,7	52,5
Tilbakeslagsventil Tapskoeffisient, K	0,01	0,01	0,01	0,01
Tregghetsmoment pumpe [kg·m ²]	0,316	0,136	0,011	0,065
Diam. rør til tank [mm]	250	250	250	250
Kote bunn tank [m]	4,9	5,0	6,3	5,2
Volum tank [m ³]	2	1	1	1
Arealflate i tank [m ²]	1	0,7	0,7	0,7
Luftvolum stasjonær starttilstand tank [%]	30	30	30	30
Luftvolum minimum [%]	10	10	10	10
Adiabatisk eksponent	1,3	1,3	1,3	1,3

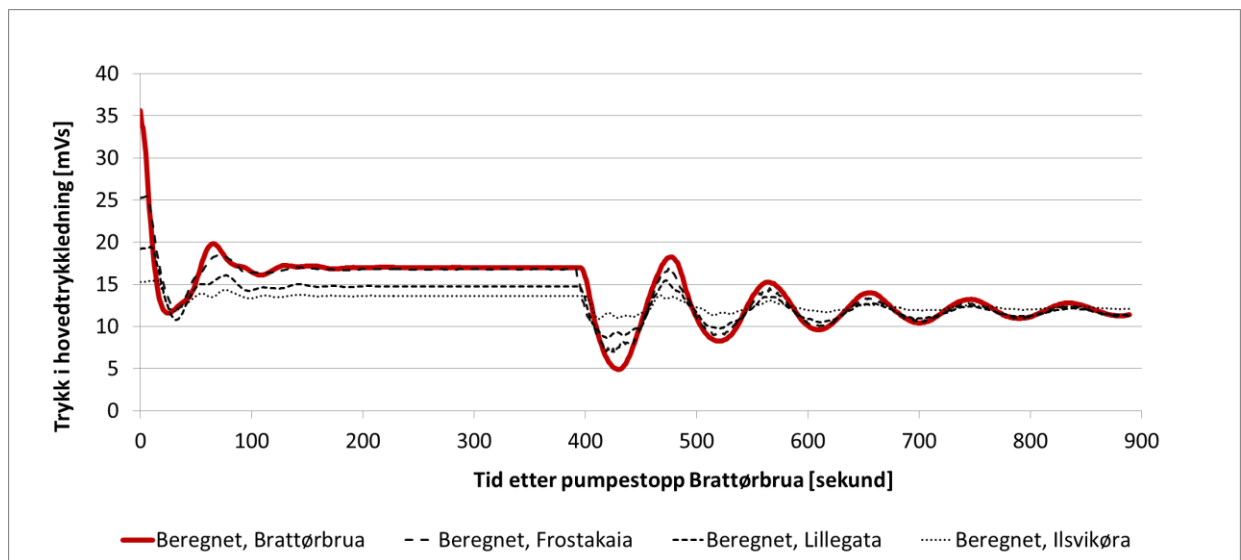
7.2 Resultater fra dynamiske beregninger med HYTRAN

Under testkjøringen av anlegget ble alle pumpene slått på og gikk samtidig i nesten 1 time før pumpene på Brattørbrua ble skrudd av, fulgt av Frostakaia 6 minutter og 10 sekunder eller 370 sekunder senere. Modellen i HYTRAN ble brukt til å se på hvordan de transiente svingningene oppstår og utvikler seg etter at pumpene på Brattørbrua og Frostakaia pumpestasjoner blir skrudd av. Som startbetingelse er målte trykkforhold og vannmengder for den stasjonære situasjon benyttet slik de er gitt i Tabell 13.

Ved simulering av pumpestopp på Brattørbrua pumpestasjon er pumpene ved de tre andre stasjonene satt til å fortsette å kjøre slik det foregikk i virkeligheten. Under simuleringen viser HYTRAN den sterkt varierende posisjonen av energilinja langs ledningen (svart) i Figur 71. Største og minste verdi for potensial langs ledningen (i grønt og blått) blir stående på skjermen og kan tas ut som beregningsresultat. Kurver for potensial mot tid kan tas ut i spesifiserte snitt som betegnet 1 til 4 i Figur 71. Resultatene for simulerte transienter slik de oppleves i de fire stasjonene er vist i Figur 72.



Figur 71 Grafisk visning av simulering av pumpestopp på Brattørbrua og Frostakaia



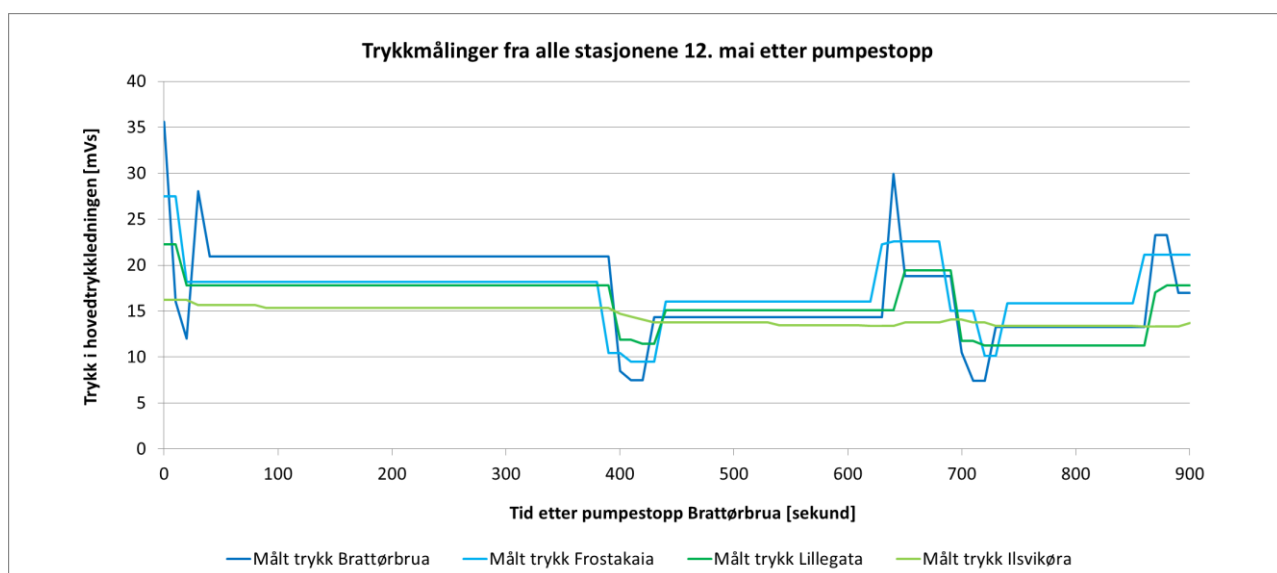
Figur 72 Simulerte trykk alle stasjoner etter pumpestopp på Brattørbrua 12. mai 2015

Hensikten med HYTRAN simuleringene er å få innsikt i hvordan systemet virker mellom annet gjennom sammenligning med målinger. De aktuelle målingene er primært trykkvariasjonene etter pumpestopp på Brattørbrua og Frostakaia, slik de er vist i Figur 73.

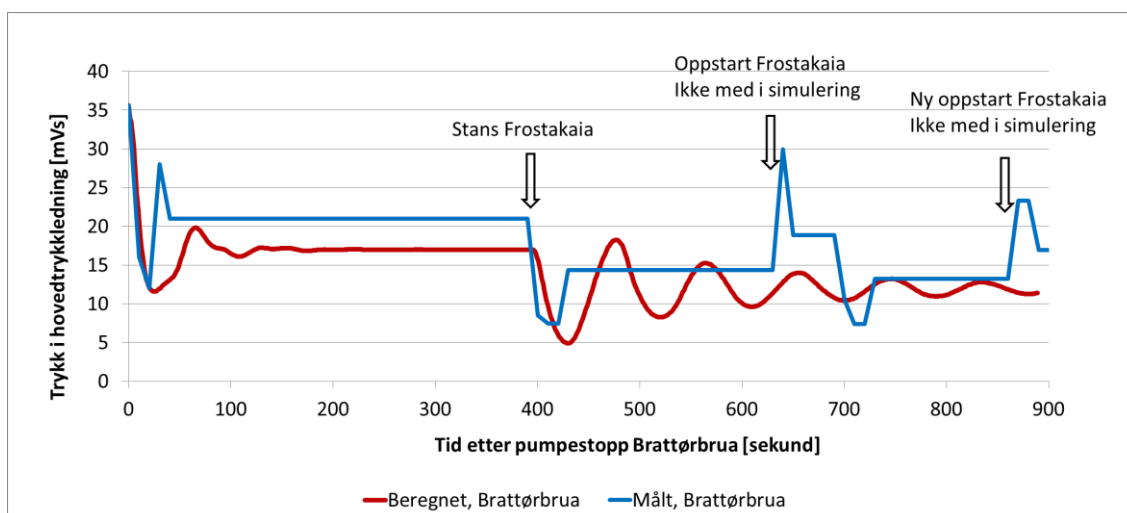
De beregnede svingningene dør fort ut etter at en stenger pumpene på Brattørbrua, men svingningene er betydelig større og varer lengre etter at pumpene på Frostakaia stanser. Det siste skyldes trolig at vannstrengene mellom Frostakaia og Brattørbrua den ene veien og Frostakaia Lillegata andre veien begge har trykkluftkammer i endene og vil svinge lettere.

Det målte trykket er vist i Figur 73 som funksjon av tid etter pumpestopp på Brattørbrua i sekunder. Pumpene stanset klokken 11:31:30, og dette tilsvarer null sekunder på tidsaksen. Pumpene på Frostakaia stanses 370 sekunder etter pumpene på Brattørbrua. Målingene av trykk kan ikke direkte sammenlignes med simuleringene i Figur 72 etter ca. 600 sekunder. Grunnen til dette er at pumpa på Frostakaia igjen slås på i to korte tidsrom fra ca. 630 til 680 sekunder og så igjen fra ca. 860 sekunder, se Figur 73. I simuleringene er oppstart av Frostakaia etter 630 sekunder og 860 sekunder ikke tatt med.

Trykkmålingene registrerer bare hvert 10. sekund og blir noe unøyaktig når en skal se på trykkstøt. Det er likevel interessant å sammenligne trykkmålingene og simuleringer beregnet i HYTRAN, så lenge en er klar over begrensningen i målenøyaktighet og målefrekvens.



Figur 73 Trykkmålinger fra hovedtrykkledningen på alle stasjonene etter pumpestopp 12. mai 2015



Figur 74 Simulerte og målte svingninger etter pumpestopp på Brattørbrua og Frostakaia 12. mai 2015

Sammenligning av simuleringen og trykkmålingen på Brattørbrua pumpestasjon er vist i Figur 74. Simuleringen er vist ved heltrukket rød linje mens trykkmålingene fra Brattørbrua pumpestasjon er vist ved blå kurve.

Simuleringene i HYTRAN viser før pumpestans på Brattørbrua pumpestasjon et stasjonært trykk på 35,6 mVs før trykket synker ned til ca. 12 mVs før det øker til ca. 20 mVs. Trykket stabiliserer seg etter dette på ca. 17 mVs. Trykkmålingene viser et lignende mønster, men synes sterkt preget av begrensinger i målenøyaktighet. Det er ikke rimelig at trykket er så konstant over lengre perioder som det tilsynelatende fremgår av både Figur 73 og Figur 74. Likevel sees en viss sammenheng mellom målinger og simuleringer. Etter pumpestans i Brattørbrua ser vi av Figur 74 at det målte trykket i stasjonen faller fra 35,6 mVs til ca. 12 mVs slik som simuleringen. Men deretter stiger målt trykk raskere enn simulert og når 28 mVs før det synker ned til 21 mVs og forblir på dette nivå til pumpe på Frostakaia stanser. Simulert trykk stabiliserer seg på 17 mVs. Avviket mellom målt og simulert trykk er på 4 mVs noe som er relativt stort. Dette kan skyldes unøyaktighet i målerne men kan også skyldes feil i modellen. En feil kunne være at eventuelle sedimenter i ledningen reduserer tverrsnittet slik at strømmingen i realiteten møter større motstand enn simulert i HYTRAN.

Både målt og simulert trykk faller med ca. 12 til 13 mVs i det pumpa på Frostakaia stanser. Simuleringen viser tydelig hvordan svingningene dør ut. Svingetiden er ca. 90 sekunder. Målingene viser ikke en tilsvarende svingning. Transienten dør raskt ut. Det er grunn til å tvile på nøyaktigheten i målerne og det synes underlig at målingene kan være så konstante over flere hundre sekunder. Den forventede måleusikkerheten skal ifølge produsenten av målerne være maksimalt 1 mVs, se avsnitt 4.3.3.

Simuleringene i HYTRAN viser hvordan trykkluftstankene demper de raske trykkstøtene, mens de langvarige transientene svingningene dominerer. De raske trykkstøtene framgår ikke av figurene over, men er synlige på dataskjerm under beregningene.

HYTRAN beregningene tar sitt utgangspunkt i en målt trykksituasjon fra 12. mai 2015 og en energilinje i samsvar med målingene er gitt som initialtilstand, (tid, $t = 0$). HYTRAN kontrollerer at initialtilstanden er i hydraulisk likevekt med pumpede vannmengder for $t = 0$. For å oppnå denne likevekten var det nødvendig å gi svært høye verdier for falltap langs ledningen slik det fremgår av Tabell 16. Gjennom dette bekrefter HYTRAN også uoverensstemmelsen mellom falltapsmodellen og målingene. Både HYTRAN og falltapsmodellen krever unormalt store tapsledd for å samsvare med målingene og bekrefter at strømningsmotstanden i systemet er større enn det som burde forventes. Årsaken kan være sedimenter eller luft i rørene.

8 DRØFTING

8.1 Trykkmålinger

Trykkmålerne ble installert i mars 2015 for å avklare en betydelig uoverensstemmelse mellom beregnet falltap og pumpekarakteristikker funnet under prosjektarbeid høsten 2014 (Nordal, 2014).

EAdata viser at trykkmålingene kvalitativt følger pumpede vannmengder og variasjonene fremstår grovt sett som svært fornuftige. I perioder er det likevel overaskende lite variasjon i trykkmålingene, som kan være konstante over flere minutter. Se til eksempel Figur 55.

Forventet maksimalt, stasjonært trykk var i størrelsesorden 35 mVs. Måleintervallet til trykksensorene ble valgt til 0 – 100 mVs for å unngå at de kunne bli ødelagt av høye transienter ved start og stopp av pumper eller ved hurtig lukking av ventiler. En konsekvens av det store måleintervallet er begrenset målenøyaktighet normalt $\leq \pm 0,5 \% \cdot 100 \text{ mVs} = 0,5 \text{ mVs}$ og maksimalt $\leq \pm 1 \% \cdot 100 \text{ mVs} = 1 \text{ mVs}$. Målerne kan ha mindre nøyaktighet ved registreringer under 10 mVs.

Målerne er kalibrert før levering av produsent. I tillegg er nøyaktigheten på trykkmålerne i dette arbeidet vurdert ved å ta utgangspunkt i en lengre periode uten pumping fra noen stasjoner i forkant av pumpe-test 12. mai 2015. Målerne viser konstante verdier i en periode på over to timer mens alle stasjonene står stille. Det er å forvente at målerne da skal vise trykk tilsvarende antall vertikale meter fra måleren og opp til utløpet i Ilsvika påslippstunnel. Målerresultatene er dokumentert i Tabell 11, som viser målte trykk mellom 13,5 og 14,5 mVs ved Brattørbrua, Frostakaia og Lillegata mens Ilsvikøra viser en avvikende verdi på 11,9 mVs. Høyden opp til utløp er mellom 10,4 og 10,9 meter.

Dette sår tvil om nøyaktigheten av trykkmålerne ut over det forventede 0,5 til 1 mVs. Det kan se ut som målerne på Brattørbrua, Frostakaia og Lillegata har innbyrdes konsistens, men de måler mellom 3 og 4 m for høyt trykk. Måleren på Ilsvikøra pumpe-stasjon viser 1 mVs for høyt, noe som er innen forventet målenøyaktighet.

Det er også overaskende lite variasjon i trykkmålingene for transienttilstanden etter pumpe-stopp, som vist i Figur 73. Det bør sjekkes om elektronikken som sender signalene til EAdata kan forårsake den tilsynelatende manglende variasjonen i trykkmålingene. Det kan synes som om det til tider er kø i dataoverføringen slik at en ikke får en kontinuerlig registrering. Det er ikke rimelig å forvente en kurve som hopper mellom konstante verdier slik figuren viser. En oppløsning på 1 mVs og avlesningsfrekvens på 10 sekunder burde gi en glattere og mykere kurve.

Målerne ble først operative fra 27. april 2015, med vellykket testkjøring 12. mai og det har vært noe kort tid til bearbeiding av resultat fra målingene og vurdere kvaliteten på disse. Det har derfor ikke vært mulig å forfølge problemstillinger knyttet til kalibrering og målenøyaktighet for å bedre dette.

Konklusjonen er at det er ønskelig å kalibrere målerne på stasjonene og sjekke bearbeiding og overføring av signaler inn til EAdata.

8.2 Observasjoner fra EAdata

EAdata synes å være et utmerket system for overvåkning og driftskontroll. En kan eksempelvis umiddelbart se når en pumpe virker dårlig og krever ettersyn.

En mer omfattende og helhetlig analyse av systemets virkemåte er også mulig basert på EAdata. Eksempler på slike analyser er dokumentert i denne oppgaven for et tilfelle med lite nedbør og normal drift, 27. april 2015, og et tilfelle med full drift på alle pumper. Full drift- tilfellet er hentet fra testkjøring 12. mai 2015. Testkjøringen er gjennomført på initiativ fra undertegnede.

Data fra 27. april, normal drift, ingen nedbør

For normal drift foreslår (John Zoeller, 2013) at en pumpe bør gå fra 5 til 30 minutter hver gang. Tradisjonelt anbefaler pumpeprodusenter at det ikke bør legges opp til flere enn 10 -15 start stopp syklene pr. time.

Brattørbrua er karakterisert ved mye lavere pumpefrekvens enn de andre stasjonene. Pumpene går alternerende og i ca. **25 minutter** med 4 til 5 timer til ny oppstart av samme pumpe. Det er installert nye pumper på stasjonen på Brattørbrua og disse ser ut til å fungere godt. Pumpene leverer enkeltvis i underkant av 85 l/s når pumpene på Frostakaia står stille, men synker til 60 l/s når Frostakaia kjører. Når pumpene på Brattørbrua går har vi et konstant trykk på 22.4 mVs. Transient trykk varierer mellom maksimalt 35,8 mVs og minimalt 2,4 mVs og vekslingene er hovedsakelig knyttet til start og stopp av pumper på Frostakaia.

Pumpene på Frostakaia går med en høy frekvens. Pumpe 1 kjører i ca. **1 minutt** før en pause på ca. 13 minutter. Dette gir i utgangspunktet ca.5 oppstart per time for denne pumpa. Pumpe 2 ser ikke ut til å virke alene, men begynner å virke når pumpe 1 slår inn, slik at det alterneres mellom pumpe 1 alene og begge pumpene. Startfrekvensen på pumpe 1 blir dermed ca. 10 oppstart per time. Kjøretiden på 1 minutt er svært kort. De pumpede vannmengdene fra pumpe 1 er i perioder over 50 l/s som overskrider måleintervallet i EAdata. Riktig vannmengde blir derfor ikke registrert.

Pumpene på Lillegata går alternerende og kjører **3 til 4 minutter** hver, og hver pumpe har en start/stoppfrekvens på litt over 20 minutter. Vannmengdene synker betydelig når pumpene på Brattørbrua kjører. Når pumpene på både Brattørbrua og Frostakaia går, leveres i korte perioder intet vann fra stasjonen selv om pumpene går.

Ved normal drift på Ilsvikøra pumpestasjon kjører pumpene alternerende. Hver av pumpene har en start stopp frekvens på litt over 24 minutter og en varighet på omtrent **5 til 6 minutter**. Vannmengdene som pumpes varierer mellom 40 l/s og 20 l/s, avhengig av om pumpene på Frostakaia og Brattørbrua går eller ikke. Stasjonen ser ut til å fungere relativt godt den 27. april 2015.

Trykkmålingene i stasjonene viser betydelige trykksvingninger i hele ledningen når pumpene på Frostakaia starter eller stopper. Trykksvingningene er mye mindre ved start/stopp av pumper på andre stasjoner. Pumpene på Frostakaia starter med ca. 7 minutters mellomrom og kjører ca. 1 minutt. Hver gang initieres betydelige transiente trykksvingninger. Trykksvingningene er dempet av trykkluftstanker på stasjonene og representerer likevel neppe et problem for systemet. Trykket er ut fra målingene hele tiden mellom atmosfæretrykket og vel 35 mVs.

Start og stopp av pumpene på stasjonene er styrt av vannivået i pumpesumpen på den samme stasjonen. Stasjonene styres derfor helt uavhengig av hverandre. Med EAdata som bakgrunn kan det synes som en samordning i mellom stasjonene med sikte på en sekvensiell kjøring av pumper bør vurderes.

Data fra 12. mai, pumpe-test full kapasitet

Testkjøring 12. mai 2015 ble gjennomført ved å samle opp vann i pumpesumpene uten pumping i over to timer før alle pumper ble slått og anlegget gikk for full kapasitet i 50 minutter.

Målingene ga konstante vannmengder og trykk etter en kort transient:

- Brattørbrua 89 l/s med trykk 35,6 mVs.
- Frostakaia 60 l/s med trykk 27,5 mVs.
- Lillegata 6 l/s med trykk 22,3 mVs.
- Ilsvikøra 28 l/s med trykk 16, 2 mVs.

Dette bekrefter vurderingene fra analyse av EAdata 27. april gjennom å vise at Lillegata nesten ikke leverer vann inn i trykkledningen når de andre stasjonene går.

Brattørbrua pumper størst volum. Frostakaia pumper ca. 2/3 av Brattørbrua sitt volum mens Ilsvikøra pumper mindre enn 1/3 av Brattørbrua sitt volum.

Generelt

En ser at pumpestasjonene konkurrerer om plassen i ledningen og kan motvirke hverandre. Brattørbrua og Frostakaia er tunge aktører og overkjører Lillegata.

Analyse av EAdata for andre perioder enn 27. april og 12. mai viser at det kan være store variasjoner i hvordan anlegget og de enkelte pumpene fungerer.

Vannmengder fra testkjøring med full kapasitet og tilhørende trykkmålinger er lagt inn i pumpekaraktistikene for pumpene i anlegget. Dette definerer faktisk driftspunkt for den stasjonære tilstanden som er oppnådd under testen. Disse driftspunktene viser at effektiviteten til pumpene er opp mot 60 %. Dette ser ut til å være forholdsvis normale verdier.

Generelt synes det som om koordinering av pumpestopp og pumpestart mellom stasjonene hadde vært hensiktsmessig. Kapasiteten på ledningen kan da ved normal drift utnyttes best og anlegget drives mest energioptimalt.

Anlegget bør likevel kjøres med full belastning regelmessig for å hindre sedimentering. Fra flere ganger ukentlig til en gang hvert døgn hadde vært en fornuftig frekvens på en slik spyling. Full gjennomspyling krever at anlegget går med full kapasitet lenge, idet det maksimalt leverer ca. 190 l/s og ledningens volum er 434.000liter. $434000\text{liter}/190\text{l/s} = 2284\text{sek} = 38\text{ minutter}$.

8.3 Falltapsmodell for stasjonær strømning

Falltapsmodellen gir betydelig lavere tap langs hovedtrykkledningen enn målingene skulle tilsi. Forskjellen mellom målt og beregnet tap er på 14,4 mVs. Det er vanskelig å forklare det store avviket mellom målt og beregnet trykk i hovedtrykkledningen. Vannet møter tydeligvis større strømningsmotstand enn falltapsmodellen basert på ordinær falltapsteori og normale verdier for friksjon og singulærtap skulle tilsi.

Et kan tenkes at antall bend og vinkelen på disse, samt kurveradien i bendet er underestimert, men det er ikke mulig å forklare avviket gjennom dette.

Et parameterstudium er gjennomført for å vurdere følsomheten i tap og beregnet potensial for variasjon i tapskoeffisientene. Det viser seg at en må multiplisere allerede høye tapsefaktorer med 8 for å få et hydraulisk potensial på Brattørbrua tilnærmet likt det målte på 38.2 mVs.

Sensitivitetsanalysen viser tydelig at det ikke er mulig å forklare avviket mellom målt og beregnet potensial på Brattørbrua pumpestasjon med normale ruheter og koeffisienter for tap i ledning og bend.

Såkalt «målt potensial» i mVs på Brattørbrua er summen av målt trykk og en moderat stedshøyde på ca 2,6 meter. Det kan derfor tenkes at uoverensstemmelsen skyldes gale trykkmålinger. Dette er berørt under seksjon 8.1. Det er lite sannsynlig at trykkmålingene er mer enn 3 til 4 mVs feil.

Ved bruk av pumpekaraktistikken på Brattørbrua ser en at for den gitte vannmengden på 43 til 46 l/s målt under testkjøring med full kapasitet 12. mai 2015, tilsvarer dette en head ved pumpe på 37,9 mVs. Dette styrker teorien om at trykkmålingene er relativt korrekte og at strømningsmotstanden i ledningen er større enn normale fall skal tilsi.

Det er på denne bakgrunn naturlig å tenke seg at det enten er sedimenter eller luft i rørene. Verdiene viser at avviket er størst i trykkledningen mellom Lillegata og Ilsvikøra og mellom Brattørbrua og Frostakaia. Dette kan antyde at disse seksjonene har mest sedimenter dersom dette er årsaken til avviket.

8.4 Transient strømning

Trykkstøtene i systemet er blitt modellert ved bruk av HYTRAN. De målte trykkene fra testkjøring 12. mai 2015 er brukt i disse simuleringene. Pumpestans på Brattørbrua og Frostakaia er simulert.

Som input til HYTRAN er det valgt så realistiske data og parametere som mulig uten noen parameter tilpasning. Et unntak er at svært høye friksjons og singulærtapskoeffisienter måtte velges for å få hydraulisk likevekt i starttilstanden. Gjennom dette bekrefter HYTRAN at falltapsmodellen drøftet i seksjon 8.3 er korrekt og at det er stor strømningsmotstand i systemet.

Simuleringene av transient strømming i HYTRAN viser hvordan trykkluftstankene demper de raske trykkstøtene, mens de langvarige transiente svingningene dominerer. De simulerte trykkstøtene er sammenlignet med trykkmålingene og viser samme tendenser som de transiente trykkmålingene. Spesielt samstemmer de umiddelbare trykkfallene rett etter pumpestans godt. De målte trykkene dør derimot for raskt ut. Det er grunn til å tvile på nøyaktigheten til trykkmålerne og det synes underlig at trykkmålingene kan være så konstante og stabile over flere hundre sekunder.

Med den usikkerheten som synes å være i måleresultatene er det ikke grunnlag for mer detaljerte sammenligninger mellom målte og beregnede verdier.

8.5 Luft eller sedimenter i ledningen

Luft

Målinger i EAdata viser at et trykkstøt initiert på Frostakaia nesten umiddelbart gir en trykkendring også på Ilsvikøra, Figur 61. Dette indikerer at ansamling av luft ikke er et stort problem i ledningen. Store mengder luft i ledningen skulle tilsi at denne først måtte komprimeres før trykk forplantes videre. En slik forsinkelse ser ut fra målingene ikke ut til å være tilstede.

Vannmengder pumpet inn i ledningen er sammenlignet med vannmengde som til samme tid måles i Ilsvika påslippstunnel er gitt i Figur 54. Figuren antyder at det er lite forsinkelse mellom endring i innpumpet mengde vann fra i stasjonene og utstrømmende mengde i tunnelen. Det innebærer at det ikke kan være mange kubikkmeter luft i ledningen. Trykkluftstankene inneholder $30\% \cdot (3 \cdot 1\text{m}^3 + 1 \cdot 2\text{m}^3) = 1,5\text{ m}^3$ luft, men dette er moderate mengder i denne sammenheng.

Beregningene med HYTRAN er gjennomført i en modell der det er antatt luftfrie ledninger. Samsvar med målinger er ikke perfekt, men simuleringene viser samme tendensen som trykkmålingene og virkningen forplanter seg uten stor forsinkelse langs hele ledningen. Sammen med målingene antyder dette at det er mindre sannsynlig at det er mye luft i ledningens høybrekk.

Et resultat som taler mot dette er funnet i seksjon 3.6, der nødvendig vannhastighet er funnet å være hele 1,78 m/s for å rive med seg luft i et ledningsstykke som heller - 4,6 grader. Det er usikkert om det eksperimentelle grunnlaget for denne vurderingen er holdbart, siden det er basert på forsøk på rørdiametre opptil 0,25 meter. Hastigheten i trykkledningen er normalt mindre eller lik 1 m/s og dermed ikke tilstrekkelig høy til å fjerne eventuell luft.

En totalvurdering vedrørende luft i ledningen synes å gå mot at luft ikke er et stort problem men denne konklusjonen er usikker.

Sedimenter

Det er et faktum at det er mye større strømningsmotstand i ledningen enn det en kan forklare med normale falltap.

Dersom det ikke er luft i ledningen som gir stor strømningsmotstand er det naturlig å tenke seg at stor strømningsmotstand skyldes sedimenter.

Ledningen er relativt horisontal med moderate lavbrekk. Det burde derfor være tilfredsstillende å vurdere faren for sedimentering som for en horisontal ledning. Dette er dekket i seksjon 3.5, som konkluderer med at hastigheten på vannet må være ca. 1 m/s for å hindre sedimentering.

Under testkjøring 12. mai 2015 på full kapasitet ble hastighetene i ledningsseksjonene basert på målte vannmengder som følger:

- Brattørbrua – Frostakaia: 1,14 m/s
- Frostakaia – Lillegata: 1,19 m/s
- Lillegata – Ilsvikøra: 0,98 m/s
- Ilsvikøra – Påslippstunnel: 0,93 m/s

Anlegget går med så store hastigheter dersom det regner betydelig, men ellers er vannmengdene og hastighetene betydelig lavere.

Dersom det først legger seg sedimenter i ledningen skal det mye større hastigheter til for å erodere og fjerne eksisterende sedimenter.

Det er innlysende at dersom tverrsnittet i trykkledningen minker på grunn av sedimentering så vil strømningsmotstanden øke. En beregning i falltapsmodellen med 20 % redusert tverrsnittsareal langs hele ledningen ga samsvar mellom trykkmålinger og beregninger.

9 KONKLUSJON

EAdata er et velfungerende system for overvåkning og driftskontroll. Eksempelvis kan en umiddelbart se når en pumpe virker dårlig og krever ettersyn.

Gjennom analyse av EAdata kan en også få innsikt i hele pumpeanleggets samlede virkemåte og funksjon.

EAdata viser mellom annet hvordan de fire pumpestasjonene blir påvirket av hverandre. Påvirkningen kan være negativ ved at pumping fra den ene stasjonen begrenser vannmengden pumpet fra den andre. Spesielt ser en at pumping Brattørbrua og Frostakaia pumpestasjoner kan hindre at pumpene på Lillegata fungerer tilfredsstillende om de går samtidig. Dette kan til tider gi en lite effektiv drift. Ved å koordinere pumping mellom stasjonene innen de grenser pumpeumpene er designet for, kan en unngå at pumpestasjonene bremser hverandre og få en mer effektiv og mer energioptimal pumping.

For å unngå sedimentering må likevel anlegget regelmessig bli kjørt med full eller tilnærmet full kapasitet der de fleste pumpene går samtidig for gjennomspyling.

Arbeidet med denne oppgaven har bidratt til at EAdata er blitt komplettert med trykkmålere på hovedtrykkledningen i pumpestasjonene. Disse ble operative fra 27. april 2015.

Trykkmålingene har gitt interessante resultater. Det er likefullt noe usikkerhet knyttet til nøyaktigheten til trykkmålingene. Det kan synes som usikkerheten er større enn ± 1 mVs, som er oppgitt fra produsent. Nøyaktigheten er kontrollert ved analyse av måleverdiene for et tilfelle uten pumping, men med en fri vannstreng i trykkledningen til utløp på kote 13,5 meter. Det er et avvik på opptil 3-4 mVs mellom målt og forventet verdi. Dette avviket kan være knyttet til en nullpunkts-fastsettelse. På denne bakgrunn er rekalibrering av målerne i stasjonene er ønskelig.

Et annet problem er at EAdata viser trykk mot tid etter pumpestopp som en hakkete kurve og har konstante trykk i overaskende lange perioder. Det kan synes som om det til tider er kø i dataoverføringen fra trykkgiverne, slik at en ikke får en kontinuerlig registrering. Kontinuerlig registrering minst hvert 10. sekund er viktig for måling av transienter. Avklaring er ønskelig.

Trykkmålingene gir, på tross av uavklarte problemer med nøyaktighet, mye interessant informasjon. Dette gjelder ikke minst endringer i målt trykk. Under normal drift den 27. april 2015 ser en til eksempel at transient trykk på Brattørbrua varierer mellom maksimalt 35,8 mVs og minimalt 2,4 mVs. Vekslingene er tydeligvis knyttet til start og stopp av pumper på Frostakaia og verdiene virker relativt rimelige. Svingningene ved pumpestopp ser ut til å dempes godt ut av trykkluftstankene på stasjonene og representerer trolig ikke en stor belastning for anlegget.

Målinger i EAdata er blitt sammenlignet med resultater fra en beregningsmodell for stasjonær strømning. Modellen er en falltapsmodell som beregner hydrauliske tap langs ledningen. Den tar hensyn til ledningsfriksjon, singulærtap, tap i tilbakeslagsventiler og tap i møtende rør i pumpestasjonene.

Det er observert at tap langs hovedledningen inne i en stasjon kan være negativt når mye vann spyles inn fra siden inn i hovedtrykkledningen. Dette skyldes at energi tilføres. I praksis viser det seg imidlertid at denne effekten er liten og at trykkvariasjonen i hovedtrykkledningen inne i en pumpestasjon varierer lite, gitt de vannmengder og tverrsnitt som gjelder i dette tilfelle. Effekten er likevel interessant.

Falltapsmodellen er et nyttig redskap for følsomhetsanalyser.

Det er funnet et betydelig avvik mellom målte trykk og beregnet trykk ut fra falltapsmodellen når normale falltapskoeffisienter er benyttet. Dette kan ha sammenheng med luft eller sedimentering i anlegget slik at tilgjengelig rørtverrsnitt reduseres.

Trykkmålingene har styrket mistanken om at strømningsmotstanden i hovedtrykkledningen er større enn det en skulle forvente ut fra normale falltap (Nordal, 2014). Mistanken bekreftes av pumpekarakteristikkene ved

at målt vannmengde gir samme «head» i karakteristikken som målt «head» fra trykkgiverne. Spesielt gjelder dette pumpekararakteristikken til pumpene på Brattørbrua. Data fra testkjøringen 12. mai er lagt til grunn for denne vurderingen.

Det er vurdert om det kunne vært luft i ledningen som skaper den økte strømningsmotstanden. Det kan komme inn luft i ledningen hvis for eksempel vannivået i pumpeumpen blir for lav. Det er identifisert tre moderate høybrekk langs ledningen og en kort seksjon med helning 4,6 grader nedover i retning vannstømmen. Resultater fra eksperimentelle studier, (Escarameia, 2005), antyder at en må opp i en vannhastighet på 1,78 m/s for fjerne luft ved slike helninger, men de eksperimentelle resultatene er basert på forsøk med mindre rørdiametre og er noe usikre.

Målinger i EA data viser at et trykkstøt initiert på Frostakaia nesten umiddelbart gir en trykkendring også på Iilsvikøra. Videre er vannmengder pumpet inn i ledningen sammenlignet med vannmengde som til samme tid måles i Iilsvika påslippstunnel. Det er lite forsinkelse mellom endring i inn-pumpet vannmengde fra stasjonene og utstrømmende mengde i tunnelen. Det tyder på at det ikke kan være store mengder luft i hovedtrykkledningen.

Vannmåleren i påslippstunnelen reagerer generelt raskt på økning i pumpede vannmengder, men synes å «sige» litt over tid for perioder der en skulle forvente en konstant vannmengde. Grunnen til dette er ikke funnet.

For å analysere transient strømming i hovedtrykkledningen er programmet HYTRAN benyttet. HYTRAN står for «HYdraulic TRANsients» og er laget for å analysere transient strømming og trykkstøt i trykkledninger. De simulerte trykkstøtene er sammenlignet med trykkmålingene og beregningene viser samme tendenser som trykkmålingene. Spesielt samstemmer de umiddelbare trykkfallene etter pumpestart godt. De målte trykkene dør derimot raskt ut mens HYTRAN viser en noe mer vedvarende svingning. Det kan være grunn til å tro at det er målingene som ikke fanger opp de svingningene som faktisk opptrer og som HYTRAN viser.

HYTRAN kontrollerer at initialtilstanden er i hydraulisk likevekt med pumpede vannmengder før pumpestart. For å oppnå denne likevekten viste det seg å være nødvendig å gi svært høye verdier for falltap langs ledningen. Gjennom dette bekrefter HYTRAN også uoverensstemmelsen mellom falltapsmodellen og målingene. HYTRAN bekrefter dermed mistankene om at det kan være relativt mye sedimenter i ledningen.

En stor mengde data er tilgjengelig i EAdata. Det er ønskelig å kalibrere trykksensorene og kvalitetssikre trykkmålingene. Når dette er utført vil det være stor verdi i å sammenligne nye simuleringer med nye målinger for å få enda bedre innsikt i hva som styrer oppførselen til anlegget for både stasjonær og ikke minst for transient tilstand.

REFERANSELISTE

- ABS Cardo group, 2012. *ABS Series FB clogless pumps*. [Internett]
Available at: <http://vulver.com.ua/pdf/FB.pdf>
[Funnet 24 1 2015].
- Asplan Viak, 2006. *Saneringsplan avløp avløpssone 1.02 Midybyen*, Trondheim: Trondheim Kommune, Trondheim Byteknisk.
- Bassett, M. D., Winterbone, D. E. & Pearson, R. J., 2001. *Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions*, Manchester: Sage publications for institution of Mechanical Engineers.
- Butler, D. & Davies, J. W., 2011. *Urban Drainage*. 3. utgave red. London: Spon Press.
- Cimbala, J., 2012. *Moody Chart Solver Excel*. [Internett]
Available at: https://www.google.no/?gws_rd=ssl#q=Moody+Chart+Solver+%2Bcimbala
[Funnet 12 12 2014].
- Danfoss, 2014. *Pressure transmitters for heavy duty applications TYPe MBS 3200 and 3250 Data sheet*, Nordborg, Danmark: Danfoss.
- Escarameia, M., 2005. *Investigating hydraulic removal of air from water pipelines*, Oxfordshire UK: Wallingford .
- Gemini, 2015. *Powel, Gemini VA*. s.l.
- Guttormsen, O., 2006. *Vassdragsteknikk II*. Trondheim: Tapir trykk.
- John Zoeller, 2013. *Design of Sewage Pumping Stations*, Louisville Kentucky USA: Zoeller pump company .
- Joukowski, N., 1898. *On the hydraulic hammer in water supply pipes (in russian)*. Moskva : s.n.
- Lawgun, D. N., 2015. *HYTRAN*. New Zealand.
- Lysne, D. K., 1976. *Selvreising i avløpsrør*. 1. utgave red. Oslo: Prosjektkomiteén for rensing av avløpsvann.
- Mellemsæther, A., 2015. *Personlig kommunikasjon*. Trondheim: Trondheim Kommune pumpegruppa.
- Moody, L. F., 1944. Friction Factors for pipe flow. I: *Transactions of the A.S.M.E.*. s.l.:Princeton, p. 14.
- Mosevoll, G., 1976. *Luft i utslippsledninger*. 1. red. Oslo: Prosjektkomiteén for rensing av avløpsvann pra 8.
- Mosevoll, G., 1988. *Trykkstøt i pumpeledninger for avløpsvann*, Trondheim: Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Forskningsråd.
- Mosevoll, G., Wedum, K. & Sægrov, S., 1991. *Håndbok for vannføringsmålinger i vann- og avløpsanlegg*, Trondheim: Statens forurensningstilsyn Program for VAR- teknikk.
- Nordal, V., 2014. *Det avskjærende avløpssystemet i Midtbyen i Trondhiem*, Trondheim: NTNU.
- Ødegaard, H. et al., 2012. *Vann- og avløpsteknikk*. 1. utgave red. Hamar: Norsk Vann.
- Olsen, T., 2015. *Owre Johnsen* [Intervju] (23 4 2015).
- Paul Jørgensen AS, 2015. *IPJ EAdata*. Trondheim: IPJ.
- Socla, 2012. *Non- returne valve Socla*. [Internett]
Available at: http://www.socla.com/site_uk/pdf_cata/p_37_38_39_40.pdf
[Funnet 25 januar 2015].

Thorolfsson, S. T., 2001. *Overvannsteknologi Fordypningsmodul Del II*. 1. utgave red. Trondheim: Institutt for vassbygging, NTNU.

Torben, L. et al., 2007. *Pumpe Ståbi*. 3. utgave red. København: Nyt Teknisk forlag.

Trondheim Kommune, 1995. *Arkiv hovedtrykkledning*, Trondheim: Trondheim Kommune.

Trondheim kommune, 1996. *Avløpsanlegg for Midtbyen og Ila*. Trondheim: Trondheim kommune.

Trondheim kommune, 2012. *Beregning av overvannsmengde vedlegg 5*, Trondheim: Trondheim kommune.

VAnytt, 2014. *VAnytt.no*. [Internett]

Available at: <http://www.vanytt.no/artikkel/7591/abs-satser-videre.html>

[Funnet 15 5 2015].

Weisbach , D., 1848. *Lehrbuch der ingenier-und maschinen- mechanik*. Vieweg: s.n.

Wrowe, C. T., Elger, D. F., Williams , B. C. & Roberson, j. A., 2010. *Engineering Fluid Mechanics*. 9. utgave red. s.l.:John Wiley & Sons.

Xylem, Flygt , 2012. <http://www.xylemwatersolutions.com/>. [Internett]

Available at: http://www.xylemwatersolutions.com/scs/norway/nb-no/Service/Reservedeler/Documents/899954_nk_high.pdf

[Funnet 20 05 2015].

Ystad, D., Mosevoll, G. & Thorolfsson, S. T., 1983. *Avskjærende Avløpsledninger Eksempel fra Steinkjer*, Trondheim: Bjærum grafiske as.

Vedlegg A

Automatisert regneark for utregning av friksjonskoeffisient etter Moodys diagram.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Moody Chart Solver								
2	J. M. Cimbala, written August 2003; latest update 05 January 2012								
3									
4	This worksheet enables a user to specify a Reynolds number and a roughness factor, and the Darcy friction factor for pipe flow is calculated.								
5	Change values ONLY in the yellow highlighted cells.								
6	Enter the Reynolds number:	Re =	483831						
7	Enter the dimensionless roughness factor:	ε/D =	0.0012						
8									
9	Result from Colebrook equation (Moody chart):	$f = 0.02108$							
10									
11	Do not mess with the hidden cells below:								
16									
17									
18									
19									

Figur A Utregning av friksjonskoeffisienten (Cimbala, 2012), brukt i regneark for beregning av energilinje.

Vedlegg B

Data fra pumpetest og pumpekaraktistikk for Flygt pumpe.



TEST REPORT

PRODUCT

Serial No. 3202.180	1280144	Performance curve No. 53- 454-00-3050	Motor module/type 130	Voltage (V) 230
Base module 051	Impeller No. 762 60 18		Imp.diam/Blade angle	Water temp °C 19.8

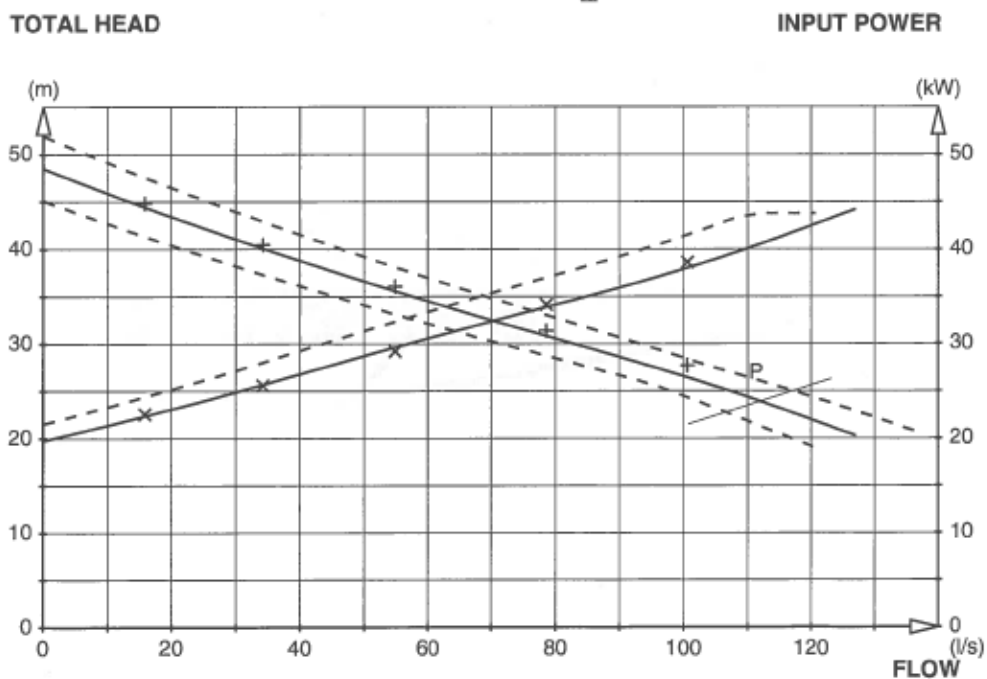
TEST RESULTS

Pump total head H (m)	Volume rate of flow Q (l/s)	Motor input power P (kW)	Voltage U (V)	Current I (A)	Overall efficiency η (%)
44.83	15.9	22.58	230	77.3	
40.47	34.2	25.61	230	83.7	
36.06	54.9	29.21	230	91.9	
31.38	78.6	34.15	230	103.5	
27.70	100.6	38.61	229	114.6	

Accepted after ISO9906/A	Test facility Lindas LS3 Sweden	Test date 12-12-13	Time 11:26	Chief tester 1358 1110 <i>P. D. 1112</i>
-----------------------------	---------------------------------------	-----------------------	---------------	--

ORDERNR 552933 POS 5

PLOTTED TEST RESULTS Measured point : + = Q/H Duty point : \diamond = Q/H Calculated point : λ = Q/ETA overall
 X = Q/P \square = Q/P \triangle = Q/ETA overall



Figur B Pumpekaraktistikk fra test av Flygt pumpe ved Brattørbrua (Mellemsæther, 2015)