# COMPUTERBASERET FJERNOVERVÅGNING AF PUMPESYSTEMERS BEHOV FOR VEDLIGEHOLD



Mareike Arensman Speciale Forår **2012** Vand og Miljø Aalborg Universitet



### Titel:

Computerbaseret fjernovervågning af pumpesystemers behov for vedligehold

### Title:

Computer-based remote monitoring of pump systems need for maintenance

### **Projekt:**

Speciale Vand og miljø

### **Projektperiode:**

1. februar 2012 - 7. juni 2012

#### **Projektgruppe:**

B205b

### Forfatter:

Mareike Arensman

#### Vejledere:

Torben Larsen Thomas Ruby Bentzen

Sideantal: 105 Appendiks: side 106 - 113 Bilag: Bilags-CD er vedlagt Afsluttet: 7. juni 2012

#### School of Engineering and Science

Study Board of Civil Engineering Sohngårdsholmsvej 57 9000 Aalborg Http://www.ses.aau.dk

#### Synopsis:

Dette projekt omhandler diagnosticeringen af pumpesystemers helbredstilstand ved kontinuert måling af tryk i en pumpestation. Hypotesen er, at pumpeslid, ændring af en tryklednings ruhed samt luft i et pumpesystem kan bestemmes ud fra trykmålinger. Forløbet af tryk ved start og stop af pumpen giver information om start- og driftstrykket i et pumpesystem, hvoraf tilstanden af pumpen og trykledningen kan diagnosticeres. Tilstedeværelsen af luft kan findes ved overvågning af trykbølgens forplantningshastighed.

Til undersøgelsen af hypotesen er trykket målt på seks pumpestationer. I en af pumpestation med to ens pumper er det observeret, at den ene pumpes ydelse er markant reduceret. Ligeledes er der ved måling observeret luft i et af pumpesystemerne.

Til analyse af trykmålingerne er der opsat en analysemodel og en numerisk model. Analysemodellen finder trykbølgens forplantningshastighed samt start- og driftstrykket, mens den numeriske model gengiver trykket. Modellerne kan ikke direkte overføres til overvågningsanlæg i pumpestationer.

Idet pumpeslid, ændret ruhed og luft kan aflæses af trykmålinger og analyseres via modellerne, bekræftes hypotesen.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatteren.

## Forord

Denne projektrapport er et 10. semesters afgangsprojektet på Vand og Miljø uddannelsen på Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet i perioden 1. februar 2012 til 7. juni 2012 af Mareike Arensman.

Projektrapporten består af en rapport med tilhørende bilags-cd. Rapporten indeholder baggrund for projektet, information og data fra trykmålinger, teori til opsætningen af modeller til analyse og gengivelse af trykmålingerne samt appendiks. De opsatte modeller kan findes på den vedlagte bilags-CD. På bilags-CDen findes ligeledes data fra trykmålinger samt projektrapporten i en digital version.

Kildehenvisning i projektrapporten er for bøger og rapporter angivet som [Forfatter, udgivelsesår] og for hjemmesider angivet som [Hjemmesidenavn, årstal]. En uddybning af kilderne kan findes i litteraturlisten.

I forbindelse med projektet vil jeg gerne takke en mine vejledere Torben Larsen og Thomas Ruby Bentzen for vejledning og støtte. Jeg vil takke Jes Vollertsen for introduktion til programmering i Delphi. Desuden vil jeg takke Ole Neerup-Jensen fra EnviDan A/S for vejledningen af VTU projektet.

Jeg vil gerne takke Aalborg Forsyning, Kloak A/S og Vestforsyning Spildevand A/S for at måtte foretage trykmålinger på pumpestationer. Jeg vil især takke Rene Sørensen og Gert Johansen fra Aalborg Forsyning, Kloak A/S samt Jette Fleng Jensen, Henry Nygaard Kragelund og Henrik Kristensen fra Vestforsyning Spildevand A/S for behjælpelighed og teknisk assistance under feltmålingerne.

Desuden vil jeg takke EnviDan A/S for at være behjælpelige med data, lån af computer, gennemlæsning af rapporten samt socialt samvær i projektperioden.

### Resume

Computerbaseret fjernovervågning af pumpesystemers behov for vedligehold er et forskningsog udviklingsprojekt støttet af Vandsektorens Teknologiudviklingsfond (VTU-fonden). Projektet er et samarbejde mellem Aalborg Universitet, EnviDan A/S, Vestforsyning Spildevand A/S og Aalborg Forsyning, Kloak A/S. Projektet er inspireret af sundhedssektoren, hvor et hjertets pumpefunktion overvåges via elektrokardiografi (EKG). Viden og erfaringerne indenfor EKG kan overføres til pumpesystemer, hvor en overvågning af trykket kan hjælpe med at diagnosticere tilstanden af centrifugalpumper og trykledninger.

VTU-projektet tager udgangspunkt i de trykvariationer, der opstår i et pumpesystem, ved start og stop af pumper. Trykket kan give information om, hvorvidt pumpen i et pumpesystem er slidt, og pumpeydelsen derved er ændret, eller om ruheden i den tilhørende trykledning er ændret. Dette gøres ved løbende at undersøge start- og driftstrykket. Ændres starttrykket, indikerer det, at pumpeydelsen er ændret. Ændres driftstrykket uden, at starttrykket forandres, skyldes det en ændring af trykledningens ruhed.

Dette afgangsprojekt er et forprojekt til VTU-projektet og vil omhandle idéerne og teorien bag VTU-projektet. Afgangsprojektet udføres for at få indblik og viden om pumpesystemer og deres helbredstilstand. For at undersøge hvorvidt der kan diagnosticeres slidtage af pumper eller aflejringer i trykledninger, udføres der i projektperioden trykmålinger på seks udvalgte pumpestationer. Pumpestationerne tilhører de to forsyningsselskaber: Vestforsyning Spildevand A/S og Aalborg Forsyning, Kloak A/S.

Trykmålingerne er i projektet undersøgt ved at opbygge en analysemodel og en numerisk model. Ud fra det målte forløb af trykket kan det aflæses, at der i en af pumpestationerne er luft tilstede i pumpesystemet. Ligeledes er der i én pumpestation med to identiske pumper diagnosticeret, at ydelsen på den ene pumpe er reduceret.

Idéerne bag VTU-projektet er i projektet undersøgt i et overordnet omfang og testet i virkeligheden. De udarbejdede modeller kan ikke direkte overføres til andre pumpestationer.

### Summary

Computer-based remote monitoring of pump systems need for maintenance is a research and development project supported by Vandsektorens Teknologiudvklingsfond (VTU-fonden), which is a Danish water sector technology fund for developments. The project is a collaboration between Aalborg University, EnviDan A/S and the utilities Vestforsyning Spildevand A/S and Aalborg Forsyning, Kloak A/S. The project is inspired by the health sector where the function of a cardiac is monitored by electrocardiography (ECG). Knowledge and experience from ECG can be transmitted to pump systems where monitoring of the pressure may help diagnose the condition of centrifugal pumps and pressure pipes.

The VTU project is based on the pressure cycle that occurs in a pump system by the starting and stopping of pumps. Pressure monitoring in a pump system can provide information about the wear of a pump and thereby a change of discharge rate or if the roughness of the associated pressure pipe has changed. This can be done by continually monitoring the starting and operating pressure. A variation of the starting pressure indicates that the pump performance has changed. If the operating pressure is modified without a change in the starting pressure it is due to a change in the roughness of the pressure pipe.

This thesis is a preliminary project to the VTU-project and will treat the ideas and theory behind VTU project. This thesis is conducted to gain insight and knowledge on pump systems and their state of health. Pressure measurements at six selected pumping stations were made in order to investigate wear of pumps or deposits in pressure pipes. The pumping stations belong to the two utilities: Vestforsyning Spildevand A/S and Aalborg Forsyning, Kloak A/S.

Pressure measurements were studied in the project by an analysis model and a numerical model. By analysis of the measurements it was found that the presence of air in the pump system can be determined from the pressure cycle. Likewise, in one pumping station with two identical pumps, it was detected that the performance of one of the pumps was reduced.

The ideas behind the VTU-project are evaluated and tested in reality. The produced models cannot be transferred directly to other pumping stations.

# Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Indledning	1
I Forundersøgelse	3
Kapitel 2 Fremtidig spildevandshåndtering	<b>5</b>
Kapitel 3 Gennemgang af pumpesystemer   3.1 Karakteristiske kurver   3.2 Ændret driftspunkt	<b>7</b> 9 11
Kapitel 4 Den tidslige udvikling af virkningsgraden af pumper i drift 1   4.1 Påvirkning af friktionstab 1   4.2 Påvirkning af volumetriske tab 1	<b>13</b> 16 17
Kapitel 5 Elektrokardiografi og benyttelse af konceptet på pumpesystemer   5.1 Overførelse af EKG til pumpesystemer	<b>19</b> 20
Kapitel 6 Hypotese	27
II Trykmåling på pumpestationer	29
Kapitel 7 Trykmåling	<b>31</b>
7.1 Fremgangsmåde	31
7.2 Pumpestation Egensevej	32
7.3 Pumpestation Syrenvej	36
7.4 Pumpestation Staby	40
7.5 Pumpestation Tvis	42
1.0 Fumpestation Mejdal	44

7.7	Pumpestation Borbjerg	47		
III An	alysemodel til trykmålinger	51		
Kapite	el 8 Analysemodel	53		
8.1	Starttryk og driftstryk	53		
8.2	Trykbølgens forplantningshastighed	56		
8.3	Opsætning af analysemodel i Delphi	59		
8.4	Resultater fra analysemodellen	60		
8.5	Vurdering af analysemodellen	68		
IV Nu	merisk modellering af trykvariation	69		
Kapite	el 9 Numerisk model	71		
9.1	Pumpekarakteristik	71		
9.2	Pumpestart	72		
9.3	Pumpestop	75		
9.4	Luftlomme	76		
9.5	Opsætning af den numeriske model i Delphi	78		
9.6	Bestemmelse af pumpekarakteristik, ruhed og luft	79		
9.7	Vurdering af den numeriske model	87		
Kapite	el 10 Bestemmelse af pumpeslid	89		
Kapite	el 11 Bestemmelse af en ændring i trykledningens ruhed	93		
Kapite	el 12 Identifikation af en luftlomme	95		
Kapite	el 13 Konklusion	99		
Kapite	el 14 Perspektivering	101		
Littera	aturliste	103		
Appendiks A Modtryk i et pumpesystem				
Appendiks B Længdeprofil Egensevej				
Appendiks C Længdeprofil Borbjerg				
Bilags	fortegnelse			

## Indledning

En veludbygget og velfungerende infrastruktur er en essentiel del af det danske velfærdssamfund. En veludbygget infrastruktur består af transport i form af veje og jernbaner, forsyning af energi og vand samt kommunikation via it og telefoner. Dette projekt omhandler forsyningssiden af infrastrukturen, hvor der ses nærmere på afledning af spildevand.

Vedligeholdelsen af afløbssystemer og vandledninger er i en årrække ikke fulgt med behovet, hvilket medfører tab for samfundet i form af utætte rørledninger [Dansk Byggeri, 2007]. Udsivning fra afløbsledninger kan give problemer i områder med drikkevandsinteresser, mens utætte vandledninger medfører spild af vandressourcerne. Det er derfor vigtigt at vedligeholde infrastrukturen samt at udarbejde fremtidssikrede løsninger ved at opdatere og videreudvikle spildevands- og drikkevandsanlæg.

En central del af spildevands- og drikkevandsanlæg er pumpesystemer, idet pumper flytter vand, hvor en transport via gravitation ikke er mulig. I Danmark findes der i forbindelse med afløbssystemer 10.100 pumpestationer [DANVA, 2012]. Dette tal vil i fremtiden øges, idet tendensen er, at renseanlæggene centraliseres, og oplandene separatkloakeres. Herved bliver oplandene til renseanlæggene større, og spildevandet skal transporteres længere, hvorved der kan være behov for flere pumpestationer. Ved separering af spildevand og regnvand graves spildevandsledninger dybere for at opnå selvrensning i ledningerne. Dette medfører flere pumpestationer, idet anlægsdybden ved afledning af vand via gravitation ellers bliver dyb. Derudover urbaniseres flere områder, hvorved forsyningsnettet for både spildevand og drikkevand bliver større. En yderligere faktor er ændringer i klimaet, hvilket medfører, at de laveste liggende områder oftere oversvømmes, samt at flere lavtliggende områder kun kan kloakeres ved etablering af pumper. [Kloakforsyningen, 2008]

For at sikre at infrastrukturen mht. spildevandsafledning er velfungerende, er der etableret central styring og overvågning i større pumpestationer. Overvågningsanlæggene er bl.a. etableret som SRO-anlæg, hvilket er et elektronisk system til Styring, Regulering og Overvågning af anlæg. SRO-anlæg kan bl.a. registrere pumpet volumenstrøm, energiforbrug og driftsproblemer. [Vandsektorens Teknologiudviklingsfond, 2012]

Overvågning af pumpesystemer kan effektiviseres ved at overføre teknologien om elektrokardiografi (EKG) fra sundhedssektoren til pumpesystemerne i spildevands- og drikkevandsanlæg. EKG teknologien omhandler, hvordan patienters hjerte-pumpefunktion kan undersøges ved at måle hjertets spændingsforskelle. Ud fra mønstergenkendelse af hjerte-pumpefunktionen kan hjertesygdomme diagnosticeres.

Princippet om mønstergenkendelse kan benyttes til trykmålinger foretaget på centrifugalpumper. I trykmålingerne ligger der information om, hvorvidt en forringelse i ydelsen skyldes en slidt pumpe, aflejringer i pumpeledningerne eller luftansamlinger i pumpesystemet. Princippet er, at overvågning af trykmålingerne skal kunne supplere regelmæssige tilsyn af pumpesystemer med vedligeholdelse efter behov. Målet er, at der derved kan opnås besparelser i forhold til reparation, tilsyn og drift samt effektivisering af spildevandsafledning og forsyningssikkerheden. Diagnosticering af et pumpesystems tilstand via trykmålinger er et igangværende udviklingsprojekt mellem Aalborg Universitet, EnviDan, Aalborg Forsyning og Vestforsyning. [Vandsektorens Teknologiudviklingsfond, 2012]

Dette afgangsprojekt omhandler de problemstillinger, der opstår i forbindelse med trykledninger og centrifugalpumper, og hvorledes trykmålinger i pumpesystemer kan analyseres via modeller. Konkret tager projektet udgangspunkt i spildevandsområdet, hvor der foretages målinger på udvalgte pumpestationer. De udførte trykmålinger analyseres og gengives i en model, hvorved trykmålingerne kan benyttes til diagnosticering af et pumpesystems tilstand.

## Del I

# Forundersøgelse

### Fremtidig spildevandshåndtering

Pumpesystemer er en central del af et afløbssystemet, derfor beskrives den fremtidige spildevandshåndtering. For at give et indblik i dette tages der udgangspunkt i spildevandsplanen for Aalborg Kommune, som er en af de kommuner, hvor trykmålinger udføres i forbindelse med projektet. Spildevandsplanen omhandler fremtidige klimaforandringer, miljømæssige konsekvenser af spildevandshåndteringen og økonomiske konsekvenser for forsyningsvirksomheden. [Kloakforsyningen, 2008]

Størstedelen af vandområderne i Aalborg Kommune lever ikke op til de opsatte målsætninger beskrevet i regionplanen [Nordjyllands Amt, 2005]. For bedre at kunne opfylde målsætningerne skal funktionen af afskærende ledningssystemer, overløbsbygværker, pumpestationer mv. optimeres, således at vandområder ikke belastes med tilførsel af organisk stof eller næringssalte fra spildevandet. Ligeledes skal gamle spildevandsledninger udbedres, idet udsivning herfra kan true drikkevandsressourcer. [Kloakforsyningen, 2008; Nordjyllands Amt, 2005]

For at optimere rensning af spildevand centraliseres renseanlægsstrukturen, hvorved der bliver færre men større renseanlæg. Aalborg Kommune har i "Vision 2100" opsat et mål om, at alt spildevand skal centraliseres til to store renseanlæg i Aalborg, hhv. Renseanlæg Vest og Renseanlæg Øst [Aalborg Forsyning, 2009]. Dette medfører, at de mindre renseanlæg i Aalborg Kommune nedlægges, og at der skal etableres lange afskærende ledningsstrækninger, som kan lede spildevandet til renseanlæggene. For at kunne lede vandet via de afskærende ledninger er det være nødvendigt at etablere flere pumpestationer. [Kloakforsyningen, 2008]

Transporten af spildevand vha. pumpestationer kræver meget energi. I Danmark transporteres over 500 millioner kubikmeter spildevand årligt, hvilket benytter 100 GWh el til transport [Grontmij, 2012]. En del af dette energiforbrug kan spares ved at optimere pumpestationerne, samt at installere SRO-anlæg ved renovering og etablering af pumpestationer. SRO-anlæggene kan regulere pumpeydelsen via frekvensomformer, hvilket kan reducere energiforbruget. En reduktion af energiforbruget mindsker bl.a. udledningen af  $CO_2$ , hvilket er til gavn for klimaet. Ligeledes vil anvendelse af SRO-anlæg kunne fremme driftsvenligheden og forbedre arbejdsmiljøet. [Kloakforsyningen, 2008]

Det er ikke kun indenfor spildevandsområdet, at SRO-anlæg vil kunne give besparelser på elforbruget. På verdensplan står pumper for 10 % af det samlede elforbrug [Grundfos, 2012]. Pumper benyttes overalt i verden til produktion og daglige aktiviteter, som opvarmning af bygninger, nedkøling af produktionsudstyr, oppumpning af olie og vand, mm. Ved at

energi<br/>optimere pumper vil elforbruget kunne optimeres, svarende til <br/> 4~% af verdens elforbrug [Grundfos, 2012].

Behovet for at pumpe vand vil stige i fremtiden, idet forandringerne i klimaet vil medføre flere episoder med kraftig nedbør [DMI, 2010]. Som følge af dette samt en yderligere stigning i antal pumpestationer pga. centralisering vil behovet for at udvikle energi- og ressourceeffektive pumpesystemet stige. Derfor undersøges det, hvorvidt overvågning af trykmålinger kan effektivisere pumpesystemer.

### Gennemgang af pumpesystemer

I et pumpesystem håndteres transporten af vand fra et trykniveau til et andet via tryk tilført af en pumpe. Et pumpesystem kan udgøres af en pumpestation med pumper, pumpesump, armaturer, sugeledning, trykledning og et oppumpningssted. Et pumpesystems armaturer er flow- og trykmåler, afspærrings- og kontraventiler, udluftningsventiler, mv. Et eksempel på et pumpesystem ses på figur 3.1.



Figur 3.1: Principskitse af et pumpesystem.

For at udligne tilløbet af væske til pumpen placeres en pumpesump i forbindelse med pumpen. På figur 3.1 er en pumpe placeret nede i pumpesumpen, dvs. en våd opstilling, men en pumpe kan også være tørt opstillet. På figur 3.2 ses to eksempler på tørt opstillede pumper, hvor pumpen på figur 3.2a er placeret i en sideliggende kælderpumpestation, mens pumpen på figur 3.2b er en selvansugende pumpe. Efter pumpen er en kontra- og afspærringsventil indbygget på trykledningen. Kontraventilen forhindrer væske i at strømme tilbage ved pumpestop. Hovedparten af kontraventilerne udføres som kontraklapventiler eller kuglekontraventiler. Afspærringsventiler indbygges for at kunne spærre af ved reparation



eller vedligehold. Udluftningsventiler monteres på toppunkter i trykledningen, hvor der er risiko for, at en luftlomme vil sætte sig. [Winther et al., 2006]

Figur 3.2: (a) pumpe placeret i en kælderpumpestation. (b) selvansugende pumpe.

Pumpetype og -model afhænger af det specifikke pumpesystem, idet pumpen dimensioneres ud den geometriske løftehøjde, rør- og enkelttab i trykledningen og vandmængden, der skal pumpes videre. Der findes flere pumpetyper, som f.eks. centrifugal-, fortrængnings-, propelog snekkepumper. I spildevandsanlæg benyttes oftest centrifugalpumper, derfor omhandler dette projekt centrifugalpumper.

Det nødvendige tryk, som en pumpe skal levere for at transportere vand, afhænger af et pumpesystems ledningskarakteristik. Det nødvendige tryk pumpen levere kaldes også for løftehøjden. Ledningskarakteristikken kan beregnes ved benyttelse af energiligningen, hvor energitabet beregnes for et tværsnit mellem pumpesumpen og oppumpningsbrønden, hvor den geometriske løftehøjde, rørtab og enkelttab inkluderes med undtagelsen af pumpen. Energitabene kaldes også for modtryk i trykledningen og er beskrevet nærmere i appendiks A. Volumenstrømmen, som en pumpe kan levere til det nødvendige tryk, afhænger af pumpekarakteristikken. Volumenstrømmen igennem pumpen defineres også som pumpeydelse. [Larsen, 2006]

### 3.1 Karakteristiske kurver

Pumper har tre karakteristiske kurver: en pumpekarakteristik, en virkningsgradskurve og en effektkurve. De karakteristiske kurver for en centrifugalpumpe ses på figur 3.3. På figuren er ligeledes en grafisk afbildning af modtrykkets variation med volumenstrømmen i form af ledningskarakteristikken.



Figur 3.3: Ledningskarakteristik, pumpekarakteristik, virkningsgradskurve og effektkurve. En stor modstand i trykledningen resulterer i en stejl ledningskarakteristik og dermed en lav volumenstrøm. Driftspunktet er skæringspunktet mellem ledningskarakteristikken og pumpekarakteristikken.

Pumpekarakteristikken er forholdet mellem løftehøjden og volumenstrømmen, som en pumpe kan levere (Q - H kurve). Bliver det nødvendige tryk større, regulerer pumpen volumenstrømmen, således modstanden kan overvindes.

Hvis volumenstrømmen er mindre, end det pumpen kan pumpe videre, kan pumpekarakteristikken ændres ved en omdrejningsregulering eller en on-off regulering. On-off regulering bruges, hvis der er flere pumper i pumpesystemet, hvorved reguleringen styrer, hvilke pumper der skal være tændte. Omdrejningsregulering styrer omdrejningstallet i pumpen, hvilket benyttes i pumpesystemer, hvor der er stor variation i behovet for pumpekapacitet. Omdrejningsregulering kan bl.a. styres af en frekvensomformer. [Winther et al., 2006]

For at beskrive pumpekarakteristikken simplificeres kurven til en andengradsligning, hvor affinitetsligninger medtages til beskrivelse af en pumpes omdrejningstal. Affinitetsligningerne beskriver forholdet mellem hhv. en trykket leveret af en pumpe og en pumpeydelsen i forhold til omdrejningstallet, hvilket ses i ligning 3.1 og ligning 3.2. [Winther et al., 2006]

$$\frac{H}{omdr^2} = konstant \tag{3.1}$$

$$\frac{Q}{omdr} = konstant \tag{3.2}$$

hvor

$$\begin{array}{ll} H & {\rm tryk} ~ [{\rm mH_2O}] \\ Q & {\rm volumenstrøm} ~ [{\rm m}^3/{\rm h}] \\ omdr & {\rm omdrejningstal} ~ [-] \end{array}$$

Affinitetsligningerne kan benyttes til at beskrive pumpekarakteristikken af en pumpe, hvor omdrejningstallet reguleres. Pumpekarakteristikken er givet ved ligning 3.3. [Wylie og Streeter, 1985]

$$H = omdr^2 \cdot B_1 + omdr \cdot B_2 \cdot Q + B_3 \cdot Q^2 \tag{3.3}$$

hvor

 $B_1, B_2, B_3$  konstanter

Pumpen kan startes og stoppes gradvis ved en frekvensomformer, der via en rampe retlinjet kører omdrejningstallet hhv. op og ned. I nogle pumpesystemer bruges en softstarter til blid start og stop af pumpemotoren, hvor det især kan være hensigtsmæssigt ved belastninger med stor inerti. En softstarter styrer spændingen tilført til pumpemotoren, og derved også strømmen ved start og stop af pumpen. Spændingen køres via softstarteren retlinjet op eller ned alt efter, om pumpen startes eller stoppes. Softstarteren hjælper motoren med at starte stille op, mens frekvensomformeren stille kører trykniveauet op. Softstarteren kan også påvirke trykniveauet ved start og stop. [Larsen, 2000; Heilmann, 2009]

En pumpes arbejdspunkt eller driftspunkt aflæses som skæringen mellem ledningskarakteristikken og pumpekarakteristikken, hvor der i skæringspunktet er ligevægt mellem pumpens tryk og modtrykket i ledningen. Denne ligevægt opstår et stykke tid efter opstart af pumpen.

Virkningsgradskurven beskriver forholdet mellem volumenstrømmen og virkningsgraden  $(Q - \eta \text{ kurve})$ . Virkningsgraden aflæses i en grafisk afbildning af pumpekarakteristikken og virkningsgradskurven, ved at finde virkningsgraden til samme volumenstrøm, som driftspunktet har. Virkningsgraden angiver, hvor mange procent af den tilførte effekt pumpen benytter til at flytte vandet. Virkningsgraden vil ikke være 100 %, idet der er

energitab i pumpens motor og i selve pumpen. På figur 3.3 er driftspunktet placeret til højre for den maksimale virkningsgrad. Driftspunktet placeres ofte lidt til højre, idet driftspunktet med tiden vil flyttet sig til venstre pga. stigende modstand og slidtage på pumpen. Herved opnås stadig en høj virkningsgrad. [Elsparefonden og DANVA, 2012]

En pumpes effektkurve er forholdet mellem volumenstrømmen og den hydrauliske effekt. Pumpens effekt kan aflæses ud fra effektkurven ved samme volumenstrøm, som driftspunktet har.

### 3.2 Ændret driftspunkt

Driftpunktet for et pumpesystem flyttes i løbet af pumpesystemets levetid, idet volumenstrømmen mindskes. Dette kan både tilskrives pumpen og trykledningen, idet pumpekarakteristikken og ledningskarakteristikken kan ændres.

En pumpes Q - H kurve vil ved slitage ændres, således at ydelsen falder. Det skyldes, at over tid vil f.eks. pumpehjulet, lejer og tætninger bliver slidt, ligesom der kan opstå belægninger på løbehjulet og indsugningsgitteret.

På figur 3.4 ses, hvordan en slidt pumpe påvirker pumpe- og ledningskarakteristikken.



Figur 3.4: Ændring af pumpe- og ledningskarakteristik ved slitage samt aflejringer og/eller luftlomme.

I trykledninger vil modstanden typisk forøges over tiden, hvilket skyldes belægninger af biofilm på indersiden af ledningerne, luftansamlinger og aflejringen af sand, grus, mv. Belægningen af biofilm og sandaflejringerne benævnes i rapporten for aflejringer. Aflejringer øger vægruheden og mindsker tværsnitsarealet af ledningerne. En større ruhed giver et større rørtab, se appendiks A. Påvirkning af aflejringer i en trykledning ses på figur 3.4.

Luftansamlinger opstår i toppunkter på ledningsstrækninger samt steder, hvor hældningen på trykledningen ændres markant. Luften kan komme ind i et pumpesystem på forskellige måder, f.eks. ved indsugning igennem utætte pakninger, luftsugende hvirvler ved indløb til pumpen, frigivelse af luft fra væsken og ved ledningsarbejde. Ansamlingerne af luft kan medføre problemer i pumpesystemer, som vibrationer i pumpen, forøgede trykstød samt en forringelse af pumpesystemets effektivitet. I væsken befinder sig opløst luft ofte nær mætning. Hvis trykket falder kan det opløste luft frigives som bobler. Luftboblerne samles til større luftlommer, som kan være svære at pumpe videre i pumpesystemet. Luft i pumpesystemet kan minimeres ved at anlægge færre toppunkter på ledningsstrækningen eller ved at placere udluftningsventiler i toppunkterne. [Elsparefonden og DANVA, 2012; Larsen, 2000]

# Den tidslige udvikling af virkningsgraden af pumper i drift

Pumper i anvendelse slides over tiden, hvilket forringer en pumpes ydelse. Der forefindes ikke meget viden om den tidslige udvikling af centrifugalpumpes slid. I de tilgængelige studier er et fald i en pumpes ydelse målt ved at registrere effektiviteten. En undersøgelse viser, at pumper som regel vil miste 5 % af deres effektivitet over de første fem år, hvorefter faldet i effektiviteten vil stabiliseres [Reynolds og Bunn, 2010]. Ifølge universitet i Darmstadt vil centrifugalpumper, som opererer med koldt vand, miste 10 % - 15 % af effektiviteten, hvis de ikke vedligeholdelses [European Commission, 2001]. En illustration af det tidslige forløb af en pumpes effektivitet ses på figur 4.1.



Figur 4.1: Det tidslige forløb af effektiviteten samt effekten af vedligeholdelse. [European Commission, 2001]

Det ses på figur 4.1, at effektiviteten forbedres, hvis pumpen vedligeholdes. For at undersøge, hvornår der er behov for at vedligeholde en pumpe, kan pumpeovervågning indføres, hvilket kan give præcis angivelse af, hvornår vedligeholdelse er påkrævet.

Størstedelen af den tilgængelige viden om den tidslige udvikling af slid af centrifugalpumper er fra universitetet i Darmstadt, som har kortlagt tabene vha. en teststand og ved teoretiske computersimuleringer i forbindelse med testene [European Commission, 2001]. Undersøgelserne foretaget af universitet i Darmstadt viser bl.a., hvad energiomsætningen i centrifugalpumper går til, hvilket ses af figur 4.2. Figuren er lavet ud fra en pumpe, der leverer en volumenstrøm på  $180 \text{ m}^3/\text{h}$  og har en omdrejningstal på 1.450 omdr/min.



Figur 4.2: Energiomsætning i pumper. Tabet er vist i forhold til den specifikke hastighed. [European Commission, 2001; Andersen et al., 2006]

Figur 4.2 viser tabet i forhold til en pumpes specifikke hastighed, hvilket kan identificeres med forskellige pumpedesign. Den specifikke hastighed benyttes, idet forskellige pumpedesign direkte kan sammenlignes ved at beregne størrelsen af den specifikke hastighed. Den specifikke hastighed,  $N_S$ , beregnes via ligning 4.1. [European Commission, 2001; Andersen et al., 2006]

$$N_S = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}} \tag{4.1}$$

hvor

n | omløbstal [omdr/min]

- Q | volumenstrøm ved bedste virkningsgrad |m<sup>3</sup>/h|
- H differenstryk ved bedste virkningsgrad [mH<sub>2</sub>O]

Det ses på figur 4.2, at der er fire slags tab. De mekaniske tab forekommer i lejer, pakdåser og lejetætninger. De volumetriske tab skyldes lækage mellem tryksiden og sugesiden i pumpen pga. slidte slidringe og benævnes derfor også lækagetab. Impeller friktions tabet er friktionstab mellem pumpehuset og løbehjulet i pumpen. Impeller friktions tabet afhænger derfor af overfladeruheden, omløbstallet og diameteren af løbehjulet. De hydrauliske tab skyldes væsken, der strømmer igennem pumpens indløb, løbehjul og udløb, og afhænger af volumenstrømmen samt ruheden. [Andersen et al., 2006]

Udover at effektiviteten forringes over tid, vil slid på pumpen have en indflydelse på pumpekarakteristikken og virkningsgradskurven, hvilket ses på figur 4.3.



Figur 4.3: Effekten af forringelsen af en pumpe. [European Commission, 2001]

Den optagede effekt bliver større ved en slidt pumpe, hvorimod virkningsgraden, trykniveauet og volumenstrømmen bliver mindre. Hvordan sliddet af pumpen påvirker pumpekarakteristikken afhænger af, om det er volumetrisk tab, friktionstab eller begge dele, der gør sig gældende.

### 4.1 Påvirkning af friktionstab

Friktionstabet afhænger bl.a. af overfladeruheden i pumpen. Ruheden kan blive større ved overfladenedbrydning som følge af korrosion, erosion og kavitation, hvor en coating af en pumpe vil gøre overfladen mere glat, og dermed ruheden mindre [Andersen et al., 2006].En sammenhæng mellem ruheden og effektiviteten for pumper med varierende specifik hastighed ses på figur 4.4.



Figur 4.4: Overfladeruhedens indflydelse på pumpevirkningsgraden. Overfladeruheden referer til korndiameteren af pålimet sand. Beregning af tab for de specifikke hastigheder er fundet via test og simuleringer. [European Commission, 2001; Moritzen, 2005]

Over tid vil overfladeruheden blive større i pumpen. Med en større ruhed mindskes virkningsgraden, idet modstanden i pumpesystemet bliver større, hvorved volumenstrømmen bliver mindre. En større ruhed i pumpen har størst påvirkningen på de høje værdier af volumenstrømmen, hvilket påvirker pumpekarakteristikken som vist på figur 4.5.



Figur 4.5: Pumpekarakteristikken for en ny pumpe og en pumpe med en større ruhed.

### 4.2 Påvirkning af volumetriske tab

Virkningsgraden falder ligeledes, når det volumetriske tab øges. Universitet i Darmstadt har lavet test samt simuleringer af sammenhængen mellem virkningsgrad og slidringen i pumpen. Slidringen består af to tæt placerede ringe, hvor der er en smal spalte imellem kaldt tætning. Tætningens effekt på virkningsgraden ses på figur 4.6.



Figur 4.6: Sammenhængen mellem størrelsen på tætningsringe og virkningsgraden. På pumpen til højre er tætningsringe markeret med rødt. [European Commission, 2001]

En slidt slidring vil medføre en bred spalte, hvorved der kan tabes 20% - 30% af volumenstrømmen igennem en pumpe og medføre et tab af energiforbruget på 30% [Andersen et al., 2006]. Det ses, at tabet af pumpeydelsen er størst ved en pumpe med en lav specifik hastighed, hvilket skyldes, at trykdifferencen over pumpen er størst. Pumpekarakteristikken for en pumpe med et forøget volumetrisk tab vil være lavere, hvilket er illustreret på figur 4.7.



Figur 4.7: Pumpekarakteristikken for en ny pumpe og en pumpe med et større volumetrisk tab.

## Elektrokardiografi og benyttelse af konceptet på pumpesystemer

Elektrokardiografi (EKG) er en metode til at måle hjerterytme på i form af hjertets elektriske aktivitet. Et hjerte er en stor muskel, der pumper blod rundt i kroppen. Hjertets opbygning kan sammenlignes med opbygningen af en fortrængningspumpe. Hjerte er opbygget af fire hjertekamre, hvoraf der er forkamre og to hovedkamre. Blodet løber først ind i højre forkammer, hvorefter det som følge af sammentrækning af forkammeret løber videre ind i højre hovedkammer. Når højre hovedkammer trækker sig sammen, pumpes uiltede blod ud af hovedkammeret og ind i lungearterierne. I lungerne bliver blodet iltet, hvorefter det løber ind i hjertets venstre forkammer, og via samme metode pumpes det videre til venstre hovedkammer og ud i hovedpulsåren. Muskelsammentrækningerne er styret af et elektrisk impulssystem. De udsendte impulser kan opfanges og bearbejdes via EKG. [Sundhedsguiden, 2006]

Undersøges hjerterytmen via EKG ses det, at der er et bestemt forløb hos raske personer, hvilket er illustreret på figur 5.1. Forløbet er en række af gentagelser af det samme mønster.



Figur 5.1: Definition af bølger, segmenter og intervaller i en stiliseret udgave af et EKGsignal hos en rask person.

Mønsteret kan beskrives af en P-bølge, et PQ-interval, et QRS-kompleks efterfulgt af et ST-segment og en T-bølge. P-bølgen beskriver forkamrenes sammentrækning, mens QRS-komplekset beskriver hovedkamrenes sammentrækning. QRS-komplekset har en større amplitude end P-bølgen, hvilket skyldes, at hovedkamrene muskelmasse er større end muskelmassen af forkamrene. T-bølgen viser, at massen af hovedkamrene når tilbage til en hvilende elektrisk tilstand. [Lægehåndbogen, 2009]

Ved løbende at undersøge hjerterytmen kan en ændring hurtig diagnosticeres, idet ændringer i forløbet undersøges ved mønstergenkendelse. Rytmeforstyrrelser i det specifikke mønster kan skyldes iltmangel i hjertet, tilstedeværelsen af en blodprop eller arvelige hjertesygdomme. Ved at undersøge i hvilken bølge eller segment de elektriske impulser er ændret, kan en mere nøjagtig diagnose stille. For eksempel kan iltmangel i dele af hjertemuskulaturen aflæses ved ændring i ST-segmentet, og en forlængelse af QT-intervallet kan indikere arvelig hjertesygdom. [Hjertedoktor.dk, 2012]

### 5.1 Overførelse af EKG til pumpesystemer

Idéen bag måling af hjertets tilstand via EKG kan overføres til pumpesystemer. Tanken er, at trykket efter en centrifugalpumpe måles, hvorved det specifikke mønster i trykket kan findes. Ved løbende at måle trykket ved start og stop af en pumpe, kan ændringer i tilstanden hurtigt opdages. En ændring i mønsteret kan benyttes til at diagnosticere, om der er opstået en ændring i pumpens tilstand, trykledningens tilstand eller i hele pumpesystemet.

### 5.1.1 Trykvariation ved pumpestart

I et pumpesystem, hvor en pumpe har været slukket et stykke tid, er trykniveauet ved pumpen lig den geometriske løftehøjde. Dette trykniveau er vist som  $h_1$  på figur 5.2. For at hæve trykket til driftspunktet,  $h_4$ , startes pumpen.



Figur 5.2: Tidsforløb af trykvariation ved opstart af en pumpe.

Ved opstart af pumpen opnås driftstrykket,  $h_4$ , ikke momentant, idet vandet i trykledningen først skal sætte i bevægelse. Trykniveauet  $h_2$ , som er situationen når pumpen når fuld omdrejningstal, opnås først, og en trykbølge sendes ud i pumpesystemet. Trykbølgen forplanter sig frem i pumpesystemet, indtil en stationær tilstand er opnået. Trykbølgen løber med trykbølgehastigheden, også kaldt forplantningshastighed, der afhænger af væskens massetæthed samt trykledningens og væskens elasticitet. Indtil den stationære tilstand er opnået, gælder Joukowskys formel, som beskriver ændringen i trykniveauet ud fra trykbølgens forplantningshastighed, c, og hastighedsændringen af væsken, se ligning 5.1. [Larsen, 2000]

$$\Delta h = \pm \frac{c}{a} \cdot \Delta V \tag{5.1}$$

hvor

 $\begin{array}{c|c} \Delta h & \text{andring i trykniveau [m]} \\ g & \text{tyngdeacceleration } [m/s^2] \\ \Delta V & \text{hastighedsændring } [m/s] \end{array}$ 

Det ses af ligning 5.1, at trykændringen kun afhænger af trykbølgens forplantningshastighed og ikke af friktion i trykledningen. Trykket stiger med hældningen  $\alpha$  ved pumpestart indtil starttrykket,  $h_2$ , som findes ved skæringen med pumpekarakteristikken, se figur 5.2. Ved starttrykket er trykket højt og volumenstrømmen lav. Da starttrykket er uafhængig af friktionen i trykledningen, vil en reduktion af starttrykket skyldes en ændring i pumpekarakteristikken.

Efter starttrykket er opnået vil trykket stige yderligere til trykniveau  $h_3$  pga. friktion i trykledningen. Trykket  $h_3$  kan over tid ændres, hvilket både kan skyldes en ændring i pumpe- og ledningskarakteristikken. Ved den stationære tilstand i pumpesystemet opnås driftstrykket  $h_4$ . En ændring af  $h_4$  over tid kan ligeledes skyldes både pumpe- og ledningskarakteristikken. Ved at undersøge værdien af driftstrykket og starttrykket, i forhold til de oprindelige værdier ved etablering af pumpesystemet, kan årsagen til ændringen i ydelsen af pumpesystemet findes via tabel 5.1.

Driftstryk $h_4$	Starttryk $h_2$	Årsag til forringelse
Forhøjet	Uændret	Modstanden i trykledningen er forøget
Reduceret	Uændret	Modstanden i trykledningen er mindsket
Reduceret	Reduceret	Pumpeydelsen er reduceret

Tabel 5.1: Årsag til ændret ydelse af pumpesystemet. [Larsen, 2012]

Ud fra tabel 5.1 kan det bestemmes, hvorvidt pumpen skal repareres eller trykledningen skal renses med en rensegris. Pumpestarten ved en slidt pumpe eller en ændring i trykledningens ruhed ses hhv. på figur 5.3 og figur 5.4.



Figur 5.3: Pumpestart ved en ændring i pumpekarakteristikken.



Figur 5.4: Pumpestart ved en ændring i ledningskarakteristikken.

Det ses, at en slidt pumpe påvirker hele forløbet af trykket, hvor en ændring af ledningskarakteristikken kun påvirker trykket i tiden efter, at starttrykket er opnået.

### 5.1.2 Trykvariation ved pumpestop

Indtil pumpen stoppes er trykket efter pumpen lig driftstrykket  $h_4$ . Når pumpen stoppes, falder trykket og volumenstrømmen, og det efterfølgende forløb af trykket afhænger af pumpesystemets opbygning. Der er forskel på korte trykledninger og lange trykledninger. Korte trykledninger defineres som trykledninger, hvor varigheden af nedregulering af pumpen ved stop er længere end den tid, som det tager trykbølgen at strømme en gang frem og tilbage i trykledningen. I lange trykledninger kan der opstå problemer med trykstød, idet et hurtigt stop medfører en negativ acceleration, hvilket forårsager en kraft fra vandmassen i henhold til Newtons anden lov. I dette projekt undersøges kun lange ledninger, i den forstand, at pumpen startes og stoppes hurtigere end trykbølgens vandring igennem pumpesystemet. [Brorsen og Larsen, 2007]

Ved pumpestop bliver volumenstrøm gennem pumpen ikke lig nul momentant, idet pumpens frekvens først kører ned. Nedkørslen foregår på to forskellige måder, alt efter om pumpetrykket er højt eller lavt, hvilket ses på figur 5.5. Ved højt pumpetryk, figur 5.5b, falder trykket jf. Joukowskys formel, indtil volumenstrømmen er nul. Volumenstrømmen kan ikke blive negativ, idet en ventil vil hindre vandet i at strømme tilbage gennem pumpen. Ved lavt pumpetryk kan volumenstrømmen fortsætte et stykke tid igennem pumpen, idet der opstår negativt tryk og dermed sug på tryksiden af pumpen, som det ses på figur 5.5a. [Larsen, 2000]



Figur 5.5: Trykstød ved lavt pumpetryk (a), hvor vandet forsætter med at strømme igennem pumpen. Trykstød ved højt pumpetryk (b), hvor ventilen lukker pga. negativ volumenstrøm.

Hvis pumpetrykket er højt, og tilfældet på figur 5.5b opnås, kan tryktabet mellem punkt 1 og punkt 2 estimeres. Ud fra et kendt tryktab, kan volumenstrømmen inden pumpestop beregnes via Joukowskys formel, se ligning 5.1. Herved kan volumenstrømmen løbende overvåges, og en ændring af volumenstrømmen kan findes. En ændring af volumenstrømmen kan skyldes en ændring af pumpekarakteristikken eller af trykledningens ruhed. For tilfældet med lavt tryk kan volumenstrømmen ikke umiddelbart estimeres, idet pumpekarakteristikken med ændret frekvens ikke kendes, og dermed kendes heller ikke volumenstrømmen i punkt 2 markeret på figur 5.5a.

De to tilfælde vist på figur 5.5 giver forskellige slags trykstød, hvor trykstødet i tilfældet med højt tryk er styret af en hastighedsændring, mens trykstødet i tilfældet med lavt tryk er styret af en trykændring. [Larsen, 2000] Et tidsforløb af trykket de første sekunder efter pumpestop ses på figur 5.6. Det ses, at trykket falder, og at en undertryksbølge dannes. Undertryksbølgen strømmer med trykbølgens forplantningshastighed ned til enden af trykledningen, hvor bølgen reflekteres som en overtryksbølge. Bølgen dæmpes gradvis pga. friktion, og det ses, at dæmpningen er langsommere end ved pumpestart illustreret på figur 5.2, hvilket skyldes, at vandhastigheden i trykledningen er mindre.



Figur 5.6: Tidsforløb af trykvariation ved pumpestop.

### 5.1.3 Trykvariation ved utæt kontraventil

En utæt kontraventil i et pumpesystem kan diagnosticeres ud fra trykket. Efter en pumpekørsel vil trykket i pumpesystemet opnå en stilstand svarende til den geometriske løftehøjde. Trykniveauet vil forblive lig den geometriske løftehøjde, indtil at pumpen startes igen. Når kontraventilen er utæt, vil der være en volumenstrøm igennem kontraventilen, og pumpesystemet vil tabe vand og tryk. Dette ses ud fra trykmåling, idet det ellers stationære tryk af trykniveauet mellem to pumpekørsler vil være gradvis aftagende. Et eksempel på en situation med en utæt kontraventil ses på figur 5.7.



Figur 5.7: Tidsforløb af trykket ved utæt kontraventil. Trykket vil være aftagende mellem to pumpekørsler.
#### 5.1.4 Trykvariation ved luft og kavitation

Trykket vil, som beskrevet i afsnit 3.2, blive påvirket, hvis der er luft i pumpesystemet. Luften vil øge modstanden i pumpesystemet, hvorved tryktab øges, og dæmpningen af trykstød sker hurtigere. Ligeledes vil luften have en påvirkning på svingningstiden af trykstødene efter pumpestop, idet trykbølgens forplantningshastighed vil reflekteres ved luftlommen.

Foruden luft kan kavitation have en indvirkning på trykket. Kavitation opstår ved undertryk, idet væsken fordamper, når trykket bliver mindre end det aktuelle damptryk. Ved fordampning dannes dampbobler, som ved en trykstigning vil implodere og skabe støj. Et eksempel på kavitation ses på figur 5.8, hvor der ved første trykstigning efter pumpestop opstår et peak. Dette skyldes kavitation, hvilket ligeledes ses af det beregnede tryk, som ikke medtager kavitation, og derfor underestimeres trykket. [Larsen, 2000]



Figur 5.8: Målt tryk i en 913 m lang trykledning i Volsted, øst for Støvring. Det beregnede tryk viser en simulering uden kavitation. [Larsen og Burrows, 1992]

# Hypotese

I de foregående kapitler er gennemgået en beskrivelse af fremtidsplaner for spildevandshåndtering, problemstillinger og hydrauliske aspekter af pumpesystemer. Antallet af pumpesystemer vil stige i fremtiden. For at mindske påvirkninger på klimaet er det vigtigt at nedbringe verdens energiforbrug. Dette kan bl.a. gøres ved at optimere pumpesystemer. Et interessant aspekt i optimering af pumpesystemer, er overførelsen af idéen bag elektrokardiografi til trykmålinger foretaget i pumpesystemer. Ved computerbaseret fjernovervågning af trykket kan pumpesystemer vedligeholdes efter behov, hvilket kan reducere energiforbruget.

Der foreligger ikke mange teorier eller studier om den tidslige udvikling af slid i pumper, hvilket heller ikke undersøges nærmere i dette projekt. Til gengæld undersøges den aktuelle tilstand af pumper, uden at specificere om det slid, der må forekomme, skyldes volumetriske tab eller øget friktionstab.

I dette projekt foretages der trykmålinger på udvalgte pumpestationer, for at kunne opnå erfaring med pumpesystemer samt for at få data af trykket under pumpekørsler. Endvidere er det et mål i projektet at opnå erfaring med teorien igennem egne opsatte modeller, som kan benyttes til analyse og gengivelse af trykmålingerne. For at diagnosticere et pumpesystems tilstand undersøges det, om følgende problemer kan identificeres via trykmålinger.

- Pumpeslid og ændring af pumpekarakteristikken
- Ændring af trykledningens ruhed
- Forekomsten af en luftlomme
- Utæt kontraventil
- Lækage
- Kavitation

Hypotesen er, at et pumpesystems tilstand kan diagnosticeres ved trykmåling, samt at overstående punkter kan identificeres.

For at verificere eller falsificere hypotesen, foretages der trykmålinger på seks pumpestationer. I forundersøgelsen er det beskrevet, hvordan pumpeslid og ændring af trykledningens ruhed kan bestemmes ud fra start- og driftstrykket samt, at tilstedeværelsen af luft kan estimeres ud fra tryksvingningerne efter pumpestop. Trykmålingerne, foretaget på de seks pumpestationer, undersøges i projektet via:

- en analysemodel til bestemmelse af start- og driftstrykket samt trykbølgens forplantningshastighed
- en numerisk model der gengiver trykket fundet ved trykmålingerne

Analysemodellen aflæser start- og driftstrykket ud fra trykket målt på de seks pumpestationer. Svingningstiden af trykket efter pumpestop estimeres via analysemodellen, hvorved trykbølgens forplantningshastighed kan bestemmes. En ændring af trykbølgens forplantningshastighed kan indikere tilstedeværelsen af luft i pumpesystemet.

For at den numeriske model kan gengive trykmålingerne, kalibreres konstanter til pumpekarakteristikken, ruheden og en luftlomme. Problemer i pumpesystemer såsom pumpeslid, ændret ruhed og luftlommer kan derved direkte opdages. I den numeriske model gengives trykket målt på to af pumpestationerne.

Strukturen for behandling af trykmålingerne i rapporten er illustreret på figur 6.1.



Figur 6.1: Struktur for behandling af trykmålinger.

I dette projekt undersøge det, hvorvidt problemer kan diagnosticeres ud fra trykmålinger. Der udarbejdes ikke én model, der direkte kan behandle data foretaget på andre pumpestationer. Ligeledes undersøges det ikke, hvordan en model kan fjernovervåge et pumpesystem ved samarbejde med et SRO-anlæg.

# Del II

# Trykmåling på pumpestationer

# Trykmåling

Trykket i pumpesystemer måles på udvalgte pumpestationer via en tryktransducer. Fremgangsmåde for trykmålingerne samt pumpestationerne er beskrevet i det følgende.

### 7.1 Fremgangsmåde

Trykket måles i manifolden efter pumperne i pumpestationen via en tryktransducer. Tryktransduceren er en Ellison Sensors GS4200 USB, der kan måle tryk i intervallet 0 bar - 16 bar og temperatur i intervallet -50 °C - 125 °C. Serienummeret på tryktransduceren er 0072845, og tryktransduceren er sidst kalibreret den 3/10 2007. Tryktransducerens nøjagtighed er  $\pm 0, 1\%$  af fuld skala. Tryktransduceren ses på figur 7.1. [ESI, 2012]



Figur 7.1: Ellison Sensor GS4200 USB tryktransducer.

Tryktransduceren tilkobles til en computer, hvor trykmålingerne gemmes. På computeren indstilles det, at trykket måles fem gange i sekundet. Måleintervallet er ikke præcis 0,2 s, men nærmere 0,2184 s.

Trykmålingen foretages på én centrifugalpumpe af gangen, selvom flere af pumpestationerne har parallelkoblede pumper. For at bestemme en pumpes starttryk, opstartes pumpen hurtigt. Dette gøres ved at minimere startrampen, således at pumpen har opnået fuld omdrejningstal, inden trykbølgen når igennem pumpesystemet, som beskrevet i afsnit 5.1.2. Ligeledes mindskes stoprampen for at måle de maksimale trykstød ved pumpestop. Pumperne tænder og slukker ved normalt drift efter fastsatte koter i pumpesumpen, men under trykmålingerne tændes og slukkes pumperne manuelt.

I forbindelse med trykmåling måles atmosfæretrykket i pumpestationerne ligeledes.

Tryktransduceren er i projektet testet ved et forsøg opstillet i laboratoriet på Aalborg Universitet. Opstilling indbefatter en vandslange, hvor trykket i vandslangen er målt ved forskellige højder af vandstanden. Trykket er herefter sammenlignet med højden på vandsøjlen. Forsøget viser, at tryktransduceren måler en korrekt trykforskel mellem to trykniveauer, men at den ikke måler et helt korrekt nulpunkt. Nulpunktet er ikke kalibreret, idet kun trykforskellene er af interesse i dette projekt. Det forkerte nulpunkt medfører, at atmosfæretrykket ikke er målt til den korrekte værdi. Idet målingerne maksimal varer en halv time, og atmosfæretrykket næsten er konstant i løbet af denne korte tidsperiode, har det ingen betydning, at det relative nulpunkt afviger fra det reelle atmosfæretryk.

### 7.2 Pumpestation Egensevej

Pumpestation Egensevej tilhører Aalborg Forsyning, Kloak A/S og er placeret på Egensevej 160 øst for Klarup, se figur 7.2.



Figur 7.2: Placering af pumpestation Egensevej samt den tilhørende trykledning. [EnviDan A/S, 2012b]

Pumpestationens formål er at pumpe spildevand fra Storvorde, Egense, Mou, Dokkedal samt den gamle Hals Kommune via en afskærende ledning til Klarup, hvorfra det pumpes videre til Renseanlæg Øst. Datablade om pumpestationen kan findes i bilag 1.

Trykledning		
$500 \mathrm{mm} \mathrm{GAI}$	P, PN10, SN10000	
- Indvend	ig diameter: $508 \text{ mm}$	
- Udvendi	g diameter: $530 \text{ mm}$	
- E-modu	l: 10.000 mPA	
Længde: 1.74	40 m	
Geometrisk l	øftehøjde ved normal drif	ťt: 5,8 m
Pumper		
Antal	Type	Modtryk ved normaldrift
1	Hidrostal E125-L03R	$6.5 \text{ mH}_2\text{O} (67 \text{ l/s})$
2	Hidrostal F10K-HD3R	$9.5 \text{ mH}_2\text{O} (225 \text{ l/s})$

Information om trykledningen og pumperne tilhørende pumpestationen ses i tabel 7.1.

Tabel 7.1: Information om trykledning og pumperne på pumpestation Egensevej. Den geometriske løftehøjde er baseret på et gennemsnitligt vandspejlsniveau i pumpesumpen. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2012]

Pumperne er tørt opstillet i en kælderpumpestation. Hidrostal E125-L03R pumpen er en grundlastpumpe, der kører konstant. De to andre pumper er større og aflaster under spidsbelastningsperioder med tilløb af store vandmængder. De to store pumper er tilsvarende og alternerer hinanden. For at vedligeholde de to store pumper kører de en gang hver morgen. Pumperne ses på figur 7.3.



Figur 7.3: (a) grundlastpumpen Hidrostal E125-L03R. (b) en af de to Hidrostal F10K-HD3R pumper.



Ledningskarakteristikken og pumpekarakteristikken for Hidrostal F10K-HD3R pumperne ses på figur 7.4. Et længdeprofil af trykledningen ses i appendiks B.

Figur 7.4: Ledningskarakteristik og pumpekarakteristik for en Hidrostal F10K-HD3R. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2012]

#### 7.2.1 Trykmåling på pumpestation Egensevej

Trykket er målt den 6/3 2012. Det målte tryk kan findes i bilag 3. Trykmålingen er foretaget på de to Hidrostal F10K-HD3R pumper. Grundlastpumpen Hidrostal E125-L03R er under målingen slukket. Trykket måles et stykke efter pumperne, se placeringen af tryktransduceren på figur 7.5.



Figur 7.5: Tryktransduceren måler på manifolden for de tre pumper, hvilket er markeret med en rød cirkel.

Startrampen på pumperne er sat til to sekunder under målingen for at starte pumperne hurtigt. Der er foretaget tre målinger, hvilket ses i tabel 7.2.

Måling nr.	1	2	3
Pumpe placeret til:	højre	venstre	højre
Startrampe [s]	2	2	2
Stoprampe [s]	30	2	2
Volumenstrøm ved stationær tilstand $~\left[\mathrm{m}^{3}/\mathrm{h}\right]$	ikke noteret	ca. 755	ca. 768

Tabel 7.2: Information om trykmåling på pumpestationen på Egensevej den 6/3 2012.

Under første måling var rampen ved pumpestop sat til 30 sekunder, hvilket blev reduceret til to sekunder ved de to sidste målinger. Det målte tryk ses på figur 7.6. Det relative nulpunkt er ikke målt ved pumpestationen, men ved fratrækning af et atmosfæretryk på ca.  $10.2 \text{ mH}_2\text{O}$  ses det, at den geometriske løftehøjde er 2,4 m.



Figur 7.6: Trykmåling på pumpestation Egensevej. Den røde linje viser, at der er en negativ hældning af trykket, når pumpeydelsen har nået en stationær tilstand. Dette skyldes, at en mindskelse af vandstanden i pumpesumpen har indflydelse. Den grønne kurve viser en bagvedliggende svingning i trykstødene efter pumpestop, hvilket kan tilskrives luft i trykledningen.

På figuren ses det, at det største trykstød sker ved opstart af pumperne. Dette trykstød er mindre ved normaldrift, da der er en længere rampe ved opstart. Ud fra trykmålingerne kan det ses, at de to pumpers tryk næsten er identisk.

Det ses, at trykniveauet er tilnærmelses retlinjet, når pumpen når driftstilstanden. Der er en svag hældning på trykniveauet, hvilket skyldes, at trykket påvirkes af, at pumpesumpen tømmes. Ved pumpestop kan det ses, at der opstår svingninger, hvilket skyldes trykstød. Forløbet af trykstødene har en tendens til en bagvedliggende svingning med længere svingningstid, hvilket ses som en grøn kurve på figur 7.6. Den bagvedliggende svingning tilskrives luft i pumpesystemet. Figur 7.7 viser et udsnit af pumpestart, hvor det ses, at der er et ekstra peak i forløbet ved pumpestart. Dette kan også skyldes luft i pumpesystemet.



Figur 7.7: Udsnit af trykket ved pumpestart.

## 7.3 Pumpestation Syrenvej

Pumpestation Syrenvej er placeret på Syrenvej 2A i Kongerslev, se figur 7.8. Pumpestationen tilhører Aalborg Forsyning, Kloak A/S.



Figur 7.8: Placering af pumpestation Syrenvej samt den tilhørende trykledning. [EnviDan A/S, 2012b]

Pumpestationen pumper spildevand fra Kongerslev og Nr. Kongerslev via en afskærende ledning til Komdrup, hvorfra det sendes videre til Renseanlæg Øst. Datablade om pumpestationen kan findes i bilag 2. Information om trykledningen og pumperne tilhørende pumpestationen ses i tabel 7.3.

Trykle	dning			
200 mr	n PE 100 PN10			
- In	dvendig diameter: 176,2 mr	n		
Længd	e: 1.950 m			
Geometrisk løftehøjde ved normal drift: 24,4 m				
Pumpe	er			
Antal	Type	Modtryk ved normaldrift		
2	Gorman Rupp V3A60-B	$41.2 \text{ mH}_2\text{O} (25 \text{ l/s})$		

Tabel 7.3: Information om trykledning og pumperne på pumpestation Syrenvej. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2012]

Pumperne er selvansugende og tilsvarende. Ledningskarakteristikken og pumpekarakteristikken for én af pumperne ses på figur 7.9.



Figur 7.9: Ledningskarakteristik og pumpekarakteristik for en Gorman Rupp V3A60-B pumperne. [Aalborg Forsyning, Kloak A/S, 2012]



Pumperne samt placeringen af tryktransduceren under målingen ses på figur 7.10.

Figur 7.10: (a) de to selvansugende Gorman Rupp V3A60-B pumper. (b) placeringen af tryktransduceren markeret med en grøn cirkel.

#### 7.3.1 Trykmåling på pumpestation Syrenvej

Trykket er målt den 16/3 2012. Det målte tryk kan findes i bilag 4. Det relative nulpunkt er målt til 9,76 mH<sub>2</sub>O. Trykmålingerne foretages skiftevis på de to pumper. Tryktransduceren er placeret i samme højde som pumperne, hvilket ses på figur 7.10b.

Startrampen på pumperne er sat ned fra 30 sekunder til et sekund for at starte pumperne hurtigt. Stoprampen er ved normal drift på ti sekunder, men er under målingen nedjusteret til et sekund. På opfordring af Rene Sørensen og Gert Johansen fra Aalborg Forsyning, Kloak A/S er stoprampen sat op ved de to sidste målinger. Dette er gjort for at se rampens påvirkning på trykstødene efter pumpestop. Der er foretaget fem målinger, hvilket ses i tabel 7.4.

Måling nr.	1	2	3	4	5
Pumpe nr.	2	1	2	1	2
Startrampe [s]	1	1	1	1	10
Stoprampe [s]	1	1	1	30	100
Niveau i pumpesump før start [m]	ikke noteret	$1,\!31$	ikke noteret	$1,\!29$	$1,\!39$
Niveau i pumpesump efter [m]	1,26	$1,\!25$	$1,\!15$	$1,\!25$	$1,\!31$

Tabel 7.4: Information om trykmåling på pumpestationen på Syrenvej den 16/3 2012.

Under måling nr. 2 og nr. 5 var der støj i pumperne, hvilket skyldes luft, idet der ikke var fuld ansugning.

Trykmålingerne ses på figur 7.11. Det ses, at den geometriske løftehøjde nærmere er 24,4 m end de 20,4 m angivet i tabel 7.3.



Figur 7.11: Trykmåling på pumpestation Syrenvej. Numrene angiver nummeret på pumpen. Det ses, at trykket er lavere ved den måling nr. 2 og nr. 4, hvilket er målingerne foretaget med pumpe nr. 1.

Det ses på figur 7.11, at trykket under måling nr. 2 og nr. 4 er lavere end ved de resterende målinger. Disse målinger er foretaget med pumpe nr. 1 i modsætning til de andre, hvor pumpen nr. 2 har kørt. Der var luft i pumpe nr. 1 under kørslen, hvilket kan sænke trykniveauet, men det ses, at forholdet mellem et større tryk ved pumpe nr. 2 gælder ved alle målingerne. Dette viser, at pumpen nr. 1 ikke yder det samme som pumpe nr. 2, selvom pumperne er tilsvarende. Dette indikerer, at pumpe nr. 1 er mere slidt end pumpe nr. 2.

Det ses, at det største trykstød opstår i forbindelse med pumpestop, modsat målingen på pumpestation Egensevej. Dette skyldes, at længdeprofilet er stejlt, end længdeprofilet på pumpestation Egensevej.

Svingningerne ved pumpestop er ikke påvirket af en bagvedliggende svingning, hvilket viser, at der sandsynligvis ikke er luft i trykledningen. Trykstødene ved pumpestop er mindre jo længere stoprampen er. Det ses, at en stoprampe på 30 sekunder (måling nr. 4) ikke har en markant virkning på trykstødene ved pumpestop sammenlignet med en rampe på et sekund (måling nr. 2). En stoprampe på 100 sekunder (måling nr. 5) dæmper derimod trykstødene, så det største trykstød opstår ved pumpestart. Stoprampen er på pumperne herefter ved almindelig drift justeret fra ti sekunder til 100 sekunder.

## 7.4 Pumpestation Staby

Pumpestation Staby ejes af Vestforsyning Spildvand A/S og er placeret syd fra Staby, hvilket ligger nær Ulfborg i Holstebro Kommune. Via pumpestationen pumpes vand fra Sønder Nissum, Husby og Staby til Ulfborg Renseanlæg. Information om trykledningen og pumperne tilhørende pumpestationen ses i tabel 7.5.

Trykledning				
200  mm PVC				
Længde: ca. $5.867 \mathrm{m}$				
Geometrisk løftehøjde ved normal drift: ca. 6 m				
Pumper				
Antal Type	Effekt			
2 Flygt 3152	$13.5 \mathrm{kW}$			

Tabel 7.5: Information om trykledning og pumperne på Pumpestation Staby. Den geometriske løftehøjde er baseret på en bundkote på ca. 3,00 i Staby og en topkote på ca. 9,00 i Ulfborg. [EnviDan A/S, 2012a; Vestforsyning Spildevand A/S, 2012]

Pumperne er vådt opstillet og sammenkobles i en overliggende pumpestation, hvilket ses på figur 7.12.



Figur 7.12: Manifolden hvor de to pumpeledninger sammenkobles. Tryktransduceren ses til venstre markeret med en rød cirkel.

#### 7.4.1 Trykmåling på pumpestation Staby

Trykket er målt den 16/5 2012. Det målte tryk kan findes i bilag 5. Det relative nulpunkt er via tryktransduceren målt til  $9,78 \text{ mH}_2\text{O}$ .

Trykket i pumpesystemet måles på manifolden efter pumperne, hvilket ses på figur 7.12. Til begge pumper er der tilkoblet en softstarter, der starter og stopper pumpemotoren gradvis ved at have en rampe på den tilførte spænding.

Der er foretaget to trykmålinger, hvor pumpe nr. 1 kørte under måling nr.1, og pumpe nr. 2 kørte ved måling nr. 2.

Det målte tryk ses på figur 7.13. Ved fratrækning af det relative nulpunkt ses det, at den geometriske løftehøjde er 6,1 m, hvilket stemmer overens med den geometriske løftehøjde angivet i tabel 7.5.



Figur 7.13: Trykmåling på pumpestation Staby.

Det ses, at det største trykstød sker ved opstart af pumperne samt, at de to pumpers ydelse næsten er identisk. Pumpe nr. 1 giver et lidt højere trykniveau end pumpe nr. 2. Det ses, at forløbet af svingningerne efter pumpestop er næsten ens. Svingningerne er ikke påvirket af en bagvedliggende svingning, hvorved der højst sandsynligt ikke er luft i pumpesystemet.

## 7.5 Pumpestation Tvis

Pumpestation Tvis er placeret vest fra Tvis, beliggende syd for Holstebro. Pumpestationen pumper vand fra Tvis til Nybo Høje. Pumpestationen tilhører Vestforsyning Spildevand A/S. Information om trykledningen og pumperne tilhørende pumpestationen ses i tabel 7.6.

Trykle	dning				
$200~\mathrm{mm}$	n PVC				
Længd	Længde: ca. 4.325 m				
Geometrisk løftehøjde ved normal drift: ca. $0{,}07\mathrm{m}$					
Pumpe	er				
Antal	Type	Effekt			
1	Flygt 3153	11 kW			
1	ABS AFP - 25 - HD	$21,3\mathrm{kW}$			

Tabel 7.6: Information om trykledning og pumperne på pumpestation Tvis. Den geometriske løftehøjde er baseret på en dækselkote på 30,93 i Tvis og en topkote på ca. 31,00 i Holstebro. [EnviDan A/S, 2012a; Vestforsyning Spildevand A/S, 2012]

Pumperne er vådt opstillet. Afspærringsventilen efter de to pumper ses på figur 7.14.



Figur 7.14: Tryktransduceren er placeret på manifolden efter de to pumper. Placeringen er markeret med en rød cirkel.

#### 7.5.1 Trykmåling på pumpestation Tvis

Trykket er målt den 16/5 2012. Det målte tryk kan findes i bilag 6. Trykket i pumpesystemet måles på fællesafgangen fra pumperne i overbygningen, hvilket ses på figur 7.14. Startrampen på pumperne er sat til to sekunder og stoprampen er indstillet til fem sekunder under målingen for at starte og stoppe pumperne hurtigt. Der er foretaget tre målinger, hvilket ses i tabel 7.7.

Måling nr.	1	2	3
Pumpe	Flygt	Flygt	ABS
Startrampe [s]	-	2	2
Stoprampe [s]	-	5	5
Niveau i pumpesump før start [m]	1,29	$1,\!29$	$0,\!87$
Niveau i pumpesump efter [m]	ikke noteret	0,72	$0,\!17$
Volumenstrøm ved stationær tilstand $~\left[{\rm m}^3/{\rm h}\right]$	39	86-87	85

Tabel 7.7: Information om trykmåling på pumpestation Tvis den 16/5 2012.

Den første måling er afbrudt, idet frekvensomformeren ikke var slået fra, hvilket blev frakoblet inden måling nr. 2. Det målte tryk ses på figur 7.15. Det ses, at den geometriske løftehøjde er større end angivet i tabel 7.6. Den geometriske løftehøjde aflæses ud fra målingerne til 1,1 m.



Figur 7.15: Trykmåling på pumpestation Tvis.

Det ses, at frekvensomformeren i måling nr. 1 har en effekt på trykket, idet trykket under målingen er mindre end ved måling nr. 2 og nr. 3. Trykmålingerne viser, at ABS pumpen i den tredje måling yder mere end Flygt pumpen i den anden måling. Det største trykstød sker ved pumpestart af pumperne.

Mens pumpen kører, er der store udsving i trykket, hvilket kan skyldes luft i pumpesystemet. Forløbet af trykstød efter pumpestop tyder ikke direkte på en luftlomme, idet svingningerne ikke er påvirket af en bagvedliggende svingning, som ved pumpestation Egensevej. Trykstødene efter pumpestop dæmpes hurtigt og når kun at svinge i kort tid efter den tredje måling. Den hurtige dæmpning kan skyldes, at kontraventilen står åben flere gange efter pumpestop, dvs. at situationen vist på figur 5.5a på side 23 opstår. Trykket dæmpes hurtigere, idet volumenstrømmen igennem pumpen fortsætter ved negativt tryk. Trykket ved pumpen er ca.  $-2 \text{ mH}_2\text{O}$  i tiden efter pumpestop. Dette tryk er estimeret ved fratrækning af det relative nulpunkt og ved at tillægge afstanden fra tryktransducerens placering og ned til pumpen, som er ca. 2 m.

Det ses, at den geometriske løftehøjde i slutningen af måleperioden er større, end inden der blev foretaget trykmålinger. Dette stemmer ikke overens med vandstanden i pumpesumpen, som er lavere efter pumpekørslerne. Grunden til det højere tryk i slutningen af måleperioden kendes ikke.

### 7.6 Pumpestation Mejdal

Pumpestation Mejdal er placeret i Mejdal, sydøst for Holstebro, og tilhører Vestforsyning Spildevand A/S. Information om trykledningen og pumperne tilhørende pumpestationen ses i tabel 7.8.

Trykledning				
110 mm PVC				
Længde: ca.	$371 \mathrm{m}$			
Geometrisk	løftehøjde ved n	ormal drift: ca. 0,6 m		
Pumper				
Antal	Type	Effekt		
2	DAE - DKP	$3 \mathrm{kW}$		

Tabel 7.8: Information om trykledning på pumpestation Mejdal. Den geometriske løftehøjde er baseret på en topkote på ca. 23,00 i Tvis og en topkote på ca. 23,60 ved oppumpningsstedet. [EnviDan A/S, 2012a; Vestforsyning Spildevand A/S, 2012]

Pumpestationen udgøres af to pumper, som er vådt opstillet, se manifolden efter pumperne på figur 7.16.



Figur 7.16: Tryktransduceren er placeret på manifolden efter de to pumper. Placeringen er markeret med en rød cirkel.

#### 7.6.1 Trykmåling på pumpestation Mejdal

Trykket er målt den 16/5 2012. Det målte tryk kan findes i bilag 7. Det relative nulpunkt er målt til 9,70 mH<sub>2</sub>O. Tryktransduceren er placeret på manifolden et stykke efter pumperne, hvilket ses på figur 7.16. Der er foretaget to målinger, hvilket ses af tabel 7.9.

Måling nr.	1	2
Pumpe nr.	1	2
Niveau i pumpesump før start [m]	$0,\!35$	$0,\!21$
Niveau i pumpesump efter [m]	$0,\!20$	$0,\!03$

Tabel 7.9: Information om trykmåling på pumpestation Mejdal den 16/5 2012.

Trykket målt på pumpestation Mejdal ses på figur 7.17. På figuren ses det, at trykket ikke var stabilt inden første pumpestart. Svingningstiden inden den første måling er ca. 15 s, hvor svingningstiden efter pumpekørslerne er 21,6 s. Den hurtigere svingningstid indikerer, at svingningerne i starten af trykmålingen ikke skyldes en tidligere pumpestart. Årsagen til svingningerne inden den første måling kendes ikke. Det gennemsnitlige tryk inden den første pumpestart er lavere end trykket efter de to pumpekørsler, hvilket er mærkværdigt, idet spildevandstilførelsen var lav i måleperioden. Det kan eventuelt være, at luft blev lukket ind i pumpesystemet, da tryktransduceren blev fastgjort, hvilket måske kan skyldes de ukendte svingninger inden den første pumpestart.



Figur 7.17: Trykmåling på pumpestation Mejdal.

Ved første måling ses det, at starttrykket når højere op end ved den anden måling, hvor det modsatte gør sig gældende for driftstrykket. Svingningsforløbet efter pumpestop er næsten ens for de to målinger. Det fremgår ligeledes af figur 7.17, at det absolutte tryk i perioder er mindre end det relative nulpunkt, hvorved der er undertryk ved tryktransduceren. Dette kan skyldes opbygningen af pumpesystemet, hvor afstanden fra pumpen til målepunktet er en til to meter. Trykket er tæt på det relative nulpunkt ved pumpen, hvorved der vil være en til to meters undertryk i punktet, hvor tryktransduceren er fastgjort.

## 7.7 Pumpestation Borbjerg

Pumpestation Borbjerg er placeret i Borbjerg øst for Holstebro og pumper vand fra Borbjerg til Savstrup ved Viborgvej. Pumpestationen ejes af Vestforsyning Spildevand A/S. Trykledningen og pumperne tilhørende pumpestationen ses i tabel 7.10.

Trykle	dning				
160 mm	n PVC				
Længd	e: ca. 2.793 m	1			
Geome	Geometrisk løftehøjde ved normal drift: ca. 19 m				
Pumpe	er				
Antal	Type	Effekt			
2	Flygt 3153	15 kW			

Tabel 7.10: Information om trykledning og pumperne på pumpestation Borbjerg. Den geometriske løftehøjde er aflæst af figur C.1 på side 113. [EnviDan A/S, 2012a; Vestforsyning Spildevand A/S, 2012]

Pumperne er vådt opstillet, hvor manifolden efter pumperne ses på figur 7.18.



Figur 7.18: (a) kontraventiler og manifold efter de to pumper. (b) placering af tryktransduceren på manifolden er markeret med en rød cirkel.

#### 7.7.1 Trykmåling på pumpestation Borbjerg

Trykket er målt den 16/5 2012. Det målte tryk kan findes i bilag 8. Det relative nulpunkt er målt til 9,63 mH<sub>2</sub>O. Tryktransduceren er placeret på manifolden et stykke efter pumperne, hvilket ses på figur 7.18. Afstanden fra tryktransduceren til bunden af pumpebrønden er ca. 2,5 m [Vestforsyning Spildevand A/S, 2012].

Der er foretaget tre målinger, hvilket ses af tabel 7.11.

Måling nr.	1	2	3
Pumpe nr.	1	2	1
Niveau i pumpesump før start [m]	$1,\!17$	$1,\!11$	$1,\!02$
Niveau i pumpesump efter [m]	$1,\!06$	$1,\!00$	0,90

Tabel 7.11: Information om trykmåling på pumpestation Borbjerg den 16/5 2012.

Ved begge pumper er der tilkoblet en softstarter, hvorved pumpemotoren gradvis startes op og stoppes ved at ændre den tilførte spænding.

Trykket målt på pumpestation Borbjerg ses på figur 7.19. Ud fra det målte tryk og ved fratrækning af det relative nulpunkt estimeres den geometriske løftehøjde til ca. 21,7 m.



Figur 7.19: Trykmåling på pumpestation Borbjerg.

Det ses på figuren, at trykket ikke var stabilt inden første pumpestart. Ligeledes ses det, at pumperne giver ca. det samme driftstryk, men at forløbet ved pumpestart er forskellig.

Dette fremgår tydeligere på figur 7.20, hvor et udsnit af pumpestart for de tre målinger er vist. Pumpe nr. 1 har en blid opstart, hvilket er vist på figur 7.20a og figur 7.20c. Trykket ved start af pumpe nr. 2 er mere stejlt og når et højere starttryk, hvilket er illustreret på figur 7.20b. Efter starttrykket er nået stiger trykket ved pumpe nr. 1 yderligere i ca. fem

sekunder, hvor der ved trykmåling med pumpe nr. 2 er et mere jævnt forløb. Årsagen til, at forløbet af trykket ser anderledes ud, kan skyldes softstarteren.



Figur 7.20: (a) udsnit af trykket ved start af pumpe nr. 1 under første måling. (b) udsnit af trykket ved start af pumpe nr. 2 under anden måling. (c) udsnit af trykket ved start af pumpe nr. 1 under tredje måling.

Efter pumpestop opstår der svingninger forårsaget af trykstød. Det første trykstød efter pumpestop er mere spids i det, end de efterfølgende trykstød. Et udsnit af dette ses på figur 7.21, som viser trykket ved måling nr. 1. Det samme gør sig gældende ved de andre målinger.



Figur 7.21: Trykvariation ved pumpestop for måling nr. 1.

Det første trykstød danner et peak, og ved sammenligning med figur 5.8 på side 25 tyder det på, at der opstår kavitation et sted i pumpesystemet. Pumpesystemet geometrisk løftehøjde er forholdsvis stor, hvorved der er større sandsynlighed for, at der opstår kavitation. En anden mulighed er, at peaket opstår, pga. påvirkning fra softstarter ved pumpestop.

# Del III

# Analysemodel til trykmålinger

# Analysemodel

Trykmålingerne foretaget på de udvalgte pumpestationer analyseres nærmere via en model opbygget i programmet Delphi. Analysemodellen opsættes efter trykmålingerne foretaget på pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej, og modellen valideres på de resterende trykmålinger. Analysemodellen opstilles således, at tidspunkter for pumpestart og pumpestop samt trykbølgens forplantningshastighed kan bestemmes ud fra måledataene. Via informationen om tidspunktet for pumpestart og pumpestop kan starttrykket og driftstrykket for de enkelte målinger bestemmes.

Trykbølgens forplantningshastighed findes via to forskellige metoder, som begge tager udgangspunkt i trykket efter pumpestop. De to metoder er bestemmelse ud fra ekstremapunkter for trykstød og via svingningstiden. Analyse af svingningstiden kan udover trykbølgens forplantningshastighed give information om luft i pumpesystemet, idet en ændring af svingningstiden kan indikere luftansamlinger i pumpesystemet.

Opbygningen af analysemodellen er beskrevet i de følgende afsnit omhandlende bestemmelse af start- og driftstryk samt bestemmelse af trykbølgens forplantningshastighed, hvorefter opsætningen i Delphi, resultater og en evaluering af analysemodellen er givet.

### 8.1 Starttryk og driftstryk

På figur 5.2 på side 20 er starttrykket,  $h_2$ , og driftstrykket,  $h_4$ , illustreret. Start- og driftstrykket bestemmes ud fra trykmålingerne ved at finde tidspunktet for pumpestart og tiden lige inden pumpestop. Ved pumpestart stiger trykniveauet indtil, at det når et toppunkt, som er defineret som starttrykket, jf. afsnit 5.1.1. Starttrykket kan bestemmes ved at undersøge trykstigningen efter pumpestart, og  $h_2$  sættes til værdien, hvor trykket ikke har en brat stigning længere.

Driftstrykket findes kort tid inden pumpen slukkes, idet det antages, at pumpes ydelse har opnået en stationær tilstand.

For at modellerne kan aflæse tidspunkterne for pumpestart og pumpestop, analyseres de målte trykvariationer ved at finde hældningen og krumningen af trykket. Trykmålingen er en tidsserie af diskrete værdier med konstant tidsskridt på ca. 0,2184 s. Hældningen findes som den første afledede med hensyn til tiden  $\frac{dh}{dt}$ , og krumningen findes som den anden afledede med hensyn til tiden  $\frac{d^2h}{dt^2}$ . På grund af støj på trykmålingerne forårsaget af pumpen findes hældningen og krumningen lokalt over  $P_0$  punkter. Hældningen og krumningen i et

givet punkt j findes hhv. af ligning 8.1 og ligning 8.2, hvor punkterne  $P_0$  er symmetrisk fordelt om j. I modellen er  $P_0 = 15$ , dvs. syv punkter på hver side af j. [Ayyub og McCuen, 2003]

$$\frac{dh}{dt} = \alpha_j = \frac{\frac{1}{P_0} \sum_{\substack{P=j-\frac{P_0}{2}}}^{P=j+\frac{P_0}{2}} (h_P - \bar{h}) \cdot (t_P - \bar{t})}{\frac{1}{P_0} \sum_{\substack{P=j-\frac{P_0}{2}}}^{P=j+\frac{P_0}{2}} (t_P - \bar{t})^2}$$

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \beta_{j+\frac{1}{2}} = \frac{\alpha_{j+1} - \alpha_j}{\Delta t}$$
(8.2)

hvor

- $\alpha \mid \text{hældning}$
- $\overline{h}$  | lokal middelværdi af trykket over  $P_0$  punkter [mH<sub>2</sub>O]
- $\overline{t}$  | lokal middelværdi af tiden over  $P_0$  punkter [s]
- $\beta \mid$  krumning

Tidspunktet for pumpestart og pumpestop findes, når visse betingelser er opfyldt. Der er opstillet fire betingelser for pumpestart og fem betingelser for pumpestop. Betingelserne er grafisk illustreret på figur 8.1 og figur 8.2. Betingelserne er fundet, ved at tilpasse analysemodellen til trykket målt på pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej.



Figur 8.1: Trykket, middeltrykket samt betingelserne for pumpestart og pumpestop. Betingelserne er vist med numre, hvor nr. 1 til 4 er betingelserne til pumpestart, og nr. 5 til 9 er betingelserne for pumpestop.



Figur 8.2: Hældning og krumning af trykket samt betingelserne for pumpestart og pumpestop. Betingelserne er vist med numre, hvor nr. 1 til 4 er betingelserne til pumpestart, og nr. 5 til 9 er betingelserne for pumpestop.

De fire betingelserne for pumpestart er:

- 1.  $h_j > H_{geo}$ , hvor  $H_{geo}$  er den geometriske løftehøjde. Trykket og den geometriske løftehøjde afrundes til et decimals nøjagtighed.
- 2.  $\beta_{j-1} > 0$  og  $\beta_{j+1} < 0$
- 3.  $\alpha_j > 0$

4. 
$$\frac{1}{11} \cdot \sum_{P=j-50}^{P=j-40} \overline{h}_P = H_{geo}$$
. Værdierne afrundes til hele tal

Den første betingelse for pumpestart er, at trykket skal være større end den geometriske løftehøjde. Den anden betingelse er, at krumningen skal være lig nul. Tredje betingelse er, at hældningen skal være positiv, hvor den fjerde betingelse er, at en middelværdi af trykket et stykke tid inden pumpestart skal være lig den geometriske løftehøjde.

Når de fire betingelser er opfyldt, er pumpen i gang. Starttrykket,  $h_4$ , findes herefter som værdien, hvor trykket ikke stiger længere, dvs. hvor  $h_j > h_{j+1}$ .

De fem betingelser, som trykket skal opfylde, for at modellen genkender tidspunktet lige inden pumpestop, er angivet i punkt nr. 5 til 9.

5.  $h_j > (\overline{h}_j + 0, 1)$ . Trykkene afrundes til et decimals nøjagtighed.

6. 
$$\beta_{j-1} > \beta_j \text{ og } \beta_j < \beta_{j+1}$$

7. 
$$\sum_{P=j+1} \beta_P < 0$$
  
8.  $\overline{h}_{j+10} < (\overline{h}_j \cdot 0, 95)$   
9.  $\frac{1}{20} \cdot \sum_{P=j-41}^{P=j-1} \alpha_P = 0$ , hvor værdien afrundes til et helt tal

Betingelse nr. 5 er, at trykket skal være mindst 0,1 m større end middeltrykket. Betingelse nr. 6 er, at kurven for krumningen skal være et ekstremum. Betingelse nr. 7 er, at summen af krumningen de næste få tidsskridt skal være under nul. Den ottende betingelse er, at det målte tryk skal være større end trykket målt ti tidsskridt senere for at sikre, at det efterfølgende tryk er lavere. Trykket multipliceres med en faktor 0,95, for at undgå at betingelsen opfyldes som følge af små svingninger forårsaget af støj. Den sidste betingelse er, at en middelværdi af hældningen i de 40 foregående tidsskridt skal være lig nul. Der vælges 40 tidsskridt for at tage højde for udsving i trykket.

Hvis alle fem betingelser er opfyldt, er det målte tryk lig driftstrykket,  $h_4$ . Tidspunktet, der findes, er typisk kort tid inden pumpestop.

### 8.2 Trykbølgens forplantningshastighed

Trykbølgens forplantningshastighed findes ud fra den tid, som det tager trykbølgen at løbe igennem pumpesystemet én gang. Forholdet mellem tiden samt trykledningens længde giver trykbølgens forplantningshastighed c, se ligning 8.3. [Larsen, 2000]

$$c = \frac{L}{T_0} \tag{8.3}$$

hvor

L længde af trykledning [m]

 $T_0 \ \big|$ tiden det tager en trykbølge af løbe igennem trykledningen én gang $\ [s]$ 

Tiden  $T_0$  findes via to metoder, nemlig bestemmelse via ekstremapunkter og via svingningsanalyse.

P=j+6

#### 8.2.1 Bestemmelse via ekstremapunkter

Ved pumpestop opstår der trykstød i et pumpesystem. Tiden mellem to ekstremapunkter på trykstødsforløbet svarer til den tid, det tager en trykbølge at nå frem og tilbage i trykledningen en gang. Den tid, det tager trykbølgen at nå gennem pumpesystemet én gang, findes derfor af ligning 8.4.

$$T_0 = \frac{T_{ekstrema}}{2} \tag{8.4}$$

hvor

 $T_{ekstrema}$  | tid mellem to ekstremapunkter [s]

Ekstremapunkterne findes i tiden efter pumpestop. For at undgå at finde forkerte ekstremapunkter i tiden lige efter at pumpen stopper, finder modellen ekstremapunkter i intervallet 50 målepunkter til 450 målepunkter efter den estimerede tid for pumpestop. Bestemmelsen af ekstremapunkterne stopper efter 450 målepunkter for ikke at medtage målepunkter, når trykstødene efter pumpestop er dæmpet.

#### 8.2.2 Bestemmelse via svingningsanalyse

Tiden, det tager trykbølgen at nå igennem trykledningen, findes ud fra svingningstiden  $T_1$ . I løbet af én svingningstid når trykbølgen frem og tilbage i trykledningen to gange, hvorved  $T_0$  findes af ligning 8.5.

$$T_0 = \frac{T_1}{4}$$
(8.5)

Formålet med bestemmelse af svingningstiden er, at en ændring af svingningstiden indikerer luft i pumpesystemet. Svingningstiden vil ændres ved tilstedeværelsen af en luftlomme, idet trykbølger i pumpesystemet vil reflekteres i luftlommen. Svingningstiden bestemmes via analyse af en sinusformet svingning, se ligning 8.6. Trykmålingerne viser, at amplituden af svingningerne aftager med tiden, hvilket er medtaget i ligning 8.6 som en eksponentiel dæmpning. [Petersen, 2008]

$$h_s = \left[a_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} \cdot (t - t_f)\right)\right] \cdot \exp^{\frac{-(t - t_f)}{T_2}} + H_{geo}$$
(8.6)

hvor

 $\begin{array}{ll} h_s & \mbox{beregnet tryk } [mH_2O] \\ a_0 & \mbox{amplitude } [mH_2O] \\ T_1 & \mbox{svingningstid } [s] \\ t & \mbox{tid } [s] \\ t_f & \mbox{tid for start af svingningsanalyse } [s] \\ T_2 & \mbox{halveringstid } [s] \\ H_{geo} & \mbox{geometrisk } løftehøjde \; [mH_2O] \\ \end{array}$ 

Konstanterne  $a_0$ ,  $T_1$ ,  $t_f$  og  $T_2$  findes ved optimering, således at trykket afviger mindst muligt fra det målte tryk. Dette gøres ved mindste kvadraters metode, se ligning 8.7, hvor værdierne findes ved den mindste værdi af fejlen E. [Ayyub og McCuen, 2003]

$$E = \sum_{i=1}^{i=t_2} (h_{m,i} - h_{s,i})^2$$
(8.7)

hvor

 $h_m$  målt tryk [mH<sub>2</sub>O]

Svingningen findes ved at sammenligne det beregnede tryk med det målte tryk i intervallet  $[t_1, t_2]$ . Intervallet findes, ved at finde to ekstremapunkter i tiden 50 målepunkter efter pumpestop. Tiden  $t_1$  sættes lig tiden til det første ekstremapunkt, og tiden  $t_2$  sættes lig tiden mellem ekstremapunkterne multipliceret med en faktor ti.

### 8.3 Opsætning af analysemodel i Delphi

Koden til at finde starttrykket, driftstrykket og trykbølgens forplantningshastighed er opbygget i Delphi og kan ses i bilag 9 til 14. Fremgangsmåde i modellen er:

- Indlæsning af konstanter
- Indlæsning af txt-filer
- Beregning af midlet tryk, midlet tid samt hældning
- Beregning af krumning
- Beregningsløkke til bestemmelse af enten  $h_2$ eller  $h_4$ 
  - Hvis pumpen er slukket, undersøges det, om de fire betingelser for pumpestart er opfyldt. Hvis de er opfyldt findes starttrykket  $h_2$ .
  - Hvis pumpen er tændt, undersøges det, om de fem betingelser for
    - tiden lig inden pumpestop er opfyldt. Hvis betingelserne er opfyldt findes:
      - Driftstrykket $h_4$
      - Ekstremapunkterne for trykstød
- Trykbølgens forplantningshastighed beregnes ved:
  - Ekstremapunkter
  - Svingningsanalyse
- Resultaterne udskrives

### 8.4 Resultater fra analysemodellen

Trykmålingerne er analyseret via analysemodellen, hvor det målte tryk og tid er indlæst. I de nedenstående afsnit er resultatet af start- og stoptider, start- og driftstryk samt trykbølgens forplantningshastighed beskrevet. Analysemodellen for de seks pumpestationer kan findes i bilag 9 til 14.

#### 8.4.1 Start- og stoptider

Tabel 8.1 viser output fra analysemodellen. Tidspunktet for stop er svær at beregne, hvorved tidspunktet for stop er fundet til få sekunder før, at pumpen reelt stopper.

Pumpestation		Egensevej	Syrenvej	Staby	Tvis	Mejdal	Borbjerg
1 91:	Pumpestart [s]	127,2	$23,\!4$	$_{30,5}$	$157,\!8$	74,1	$13,\!9$
1. manng	$Pumpestop \ [s]$	$321,\!3$	$95,\!2$	171,4	182,7	129,4	$92,\!3$
9 måling	Pumpestart [s]	734,1	387,6	407,8	279,4	210,7	285,3
2. manng	$Pumpestop \ [s]$	804,4	471,0	$982,\!8$	422,8	$353,\!6$	344,4
0 01'	Pumpestart [s]	1108,2	697,4	1303,2	770,0	411,5	_
5. manng	$Pumpestop \ [s]$	1176,0	806,3		$795,\!3$		-
4. måling	Pumpestart [s]		1.073,2		951,1		
	$Pumpestop \ [s]$		$1.134,\!3$				
۳ ۱:	Pumpestart [s]		$1.553,\!2$				
5. manng	Pumpestop [s]		-				

Tabel 8.1: Estimeret tidspunkter for pumpestart og -stop.

I tabellen ses det, at analysemodellen ikke har fundet alle tider for pumpestation Syrenvej og pumpestation Borbjerg. Ligeledes ses det, at der er fundet for mange tider til pumpestation Staby, Tvis og Mejdal, hvor der kun er målt to gange i pumpestation Staby og Mejdal og tre gange i pumpestation Tvis. For at undersøge årsagen til dette er de fundne tidspunkter plottet op imod det målte tryk, hvilket ses af nedenstående figurere.
På figur 8.3 kan de fundne start- og stoptider ses i forhold til det målte tryk for pumpestation Egensevej. Det ses, at de beregnede tidspunkter for start og stop er sammenfaldende med trykmålingerne.



Figur 8.3: Målt tryk på pumpestation Egensevej samt tider for pumpestart og -stop estimeret via analysemodellen.

Figur 8.4 viser de fundne tider og det målte forløb for pumpestation Syrenvej. Analysemodellen kan med de opsatte betingelser ikke finde tidspunktet for det sidste pumpestop, hvilket skyldes, at der er en længere rampe på ved stop.



Figur 8.4: Målt tryk på pumpestation Syrenvej samt tider for pumpestart og -stop estimeret via analysemodellen.

På figur 8.3 og figur 8.4 er det illustreret, at analysemodellen finder de korrekte start- og stoptider for pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej. Analysemodellen valideres på baggrund af trykket målt de andre pumpestationer.

De fundne start- og stoptider for pumpestation Staby er vist i forhold til det målte tryk på figur 8.5. Det ses, at tiderne stemmer overens med den første måling, men at den næste pumpestart allerede findes under svingningen efter første pumpekørsel. Det efterfølgende pumpestop er fundet til det rigtige tidspunkt, men i den efterfølgende svingning findes igen en pumpestart. Årsagen til dette er, at modellen ikke kan finde de rigtige tider for pumpestart, idet betingelserne til pumpestart fejlagtigt opfyldes i svingningsforløbet efter pumpestop. Den eneste betingelse, der kan justeres, er den 4. betingelse, men i et forsøg på at ændre betingelsen kan modellen ikke finde start- og stoptider for pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej. Derfor er betingelsen ikke ændret, hvorved modellen ikke direkte kan benyttes til pumpestation Staby.



Figur 8.5: Målt tryk på pumpestation Staby samt tider for pumpestart og -stop estimeret via analysemodellen.

De fundne start- og stoptider for pumpestation Tvis ses på figur 8.6. Det ses, at tidspunkterne til den første måling er i overensstemmelse med trykmålingen. Herefter opstår der samme fejl som ved pumpestation Staby, idet analysemodellen finder en pumpestart i svingningerne efter første måling. Det samme gør sig gældende efter tredje måling, hvor en ekstra pumpestart findes. Analysemodellen finder heller ikke de rigtige tidspunkter for pumpestop ved måling nr. 2 og nr. 3.



Figur 8.6: Målt tryk på pumpestation Tvis samt tider for pumpestart og -stop estimeret via analysemodellen.

Figur 8.7 viser de beregnede tidspunkter for pumpestation Mejdal. Ved analysen af trykmålingerne er trykket fundet som det relative nulpunkt ikke fratrukket, idet trykket derved vil være negativt. Den geometriske løftehøjde er derfor sat til trykket målt inden pumpestart, hvilket er 8,0 m. Det ses, at modellen igen estimerer tider for pumpestart i svingningsforløbet samt at der findes en ekstra tid for pumpestart.



Figur 8.7: Målt tryk på pumpestation Mejdal samt tider for pumpestart og -stop estimeret via analysemodellen.

Figur 8.8 viser de beregnede tidspunkter for pumpestation Borbjerg samt det målte tryk. Den første pumpestart findes allerede inden den første måling, idet trykket ikke er stabilt her. Tiden for de to efterfølgende pumpestop passer fint overens med målingerne. Den tredje måling finder analysemodellen ikke, hvilket skyldes, at trykket ved pumpestarten er anderledes som følge af en indflydelse fra softstarteren, se afsnit 7.7.



Figur 8.8: Målt tryk på pumpestation Borbjerg samt tider for pumpestart og -stop estimeret via analysemodellen.

Analysemodellen er lavet ud fra pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej, hvor de korrekte tider findes. Valideringen op imod de resterende pumpestationer viser, at modellen skal have bedre startbetingelser, så svingningerne efter en pumpekørsel ikke bliver opfattet som en ny pumpestart. Tidspunkterne for pumpestop passer overens med det målte, på nær ved pumpestation Tvis.

Ud fra de fundne tider til pumpestart og -stop kan start- og driftstrykket bestemmes.

#### 8.4.2 Start- og driftstryk

Starttrykket findes kun for de målinger, hvor analysemodellen har fundet et starttidspunkt. Det samme gælder for driftstrykket og trykbølgens forplantningshastighed, hvor værdierne kun findes til de målinger, hvor stoptidspunktet er fundet.

Starttrykket findes ud fra trykstigningen. Starttrykket er givet som trykket, hvor trykstigningen skifter fra en stejl stigning til næsten vandret forløb af trykket med små fluktuationer fra pumpen. Derfor findes starttrykket,  $h_2$ , ved at sammenligne trykket  $h_j$  med  $h_{j+1}$ . Ved  $h_j > h_{j+1}$  sættes starttrykket lig  $h_j$ .

Driftstrykket,  $h_4$ , sættes til det målte tryk i det estimerede tidspunkt for stop. De fundne start- og driftstryk ses i tabel 8.2.

Pumpestation		Egensevej	Syrenvej	Staby	Tvis	Mejdal	Borbjerg
1 måling	$h_2$ [m]	19,486	$32,\!275$	$24,\!255$	$9,\!893$	$18,\!297$	$22,\!053$
1. manng	$h_4$ [m]	6,501	$27,\!359$	$23,\!826$	$7,\!440$	$14,\!061$	$35,\!555$
0 måling	$h_2$ [m]	17,895	26,762	7,076	$2,\!170$	8,654	40,237
2. manng	$h_4$ [m]	6,524	$23,\!307$	$23,\!287$	$20,\!863$	$14,\!180$	$35,\!295$
2	$h_2$ [m]	18,034	30,900	6,500	24,012	9,637	-
J. maning	$h_4$ [m]	6,507	$27,\!084$		$23,\!083$		-
4 91:	$h_2$ [m]		26,027		$2,\!584$		
4. manng	$h_4$ [m]		$23,\!070$				
5. måling	$h_2$ [m]		30,561				
	$h_4$ [m]		-				

Tabel 8.2: Starttryk, h<sub>2</sub>, og driftstryk, h<sub>4</sub>, estimeret via analysemodellen.

For pumpestation Egensevej ses det, at start- og driftstrykket er næsten ens for målingerne. Starttrykket er fundet til at være ca. tre gange større end driftstrykket.

Ud fra start- og driftstrykket for pumpestation Syrenvej ses det, hvilke målinger, der er foretaget med en pumpe med en forringet ydelse, dvs. pumpe nr. 1. Ved måling nr. 2 og nr. 4 ligger starttrykket ca. fem meter lavere og driftstrykket fire meter lavere end de resterende målinger, hvilket skyldes, at trykmålingerne er foretaget med pumpe nr. 1. For pumpestation Staby kan starttrykkene ikke sammenlignes, idet de forkerte starttider er fundet. Driftstrykket er identisk for de to målinger.

Størstedelen af start- og driftstrykket for pumpestation Tvis er ikke de rigtige pga. forkerte start- og stoptider. Ved pumpestation Mejdal og pumpestation Borbjerg har analysemodellen fundet de rigtige værdier af driftstrykket, og det ses, at trykket er tilsvarende ved målingerne for de enkelte pumpestationer.

#### 8.4.3 Svingningsanalyse

Svingningsforløbet gengivet via ligning 8.6 på side 58 kan for målingerne udført på pumpestation Egensevej ses på figur 8.9. Figuren viser, at det simulerede tryk afviger fra det målte tryk, specielt ved den tredje måling. Generelt ses det, at svingningstiden er sammenfaldende med det målte, men at amplituden samt den bagvedliggende svingning ikke er gengivet.



Figur 8.9: Gengivelse af svingningsforløbet for pumpestation Egensevej.

Det simulerede svingningsforløb for pumpestation Syrenvej ses på figur 8.10. På figuren ses det, at svingningsforløbene er sammenfaldende, samt at dæmpningen af trykket ved det beregnede svingningsforløb er hurtigere.



Figur 8.10: Gengivelse af svingningsforløbet for pumpestation Syrenvej.

Analysemodellen simulerer nogenlunde svingningerne for de to pumpestationer. Analysemodellen valideres op imod trykmålingerne foretaget på de resterende pumpestationer.



Svingningsforløbet for pumpestation Staby ses på figur 8.11. Det fremgår, at svingningen af trykket ikke er gengivet, men at trykket falder for derefter at blive retlinjet.

Figur 8.11: Gengivelse af svingningsforløbet for pumpestation Staby.

På figur 8.12 svingningsforløbet for pumpestation Tvis gengivet. Det ses, at de to sidste svingningsforløb ikke er korrekte. Årsagen til dette er, at de rigtige tidspunkter for pumpestop ikke blev fundet, jf. figur 8.6. Den første svingning er til dels gengivet, men tryksvingningerne er ikke sammenfalden med de målte svingninger af trykket, idet svingningerne hurtig stabiliseres i analysemodellen.



Figur 8.12: Gengivelse af svingningsforløbet for pumpestation Tvis.

Svingningsanalysen er i bedre overensstemmelse med målingerne foretaget på pumpestation Mejdal, hvilket ses på figur 8.13. Det beregnet svingningsforløb dæmpes hurtigere end det målte svingningsforløb efter pumpestop. Svingningstiden i den anden måling stemmer overens med målingen, men den beregnede svingningstid er for langsom i måling nr. 1.



Figur 8.13: Gengivelse af svingningsforløbet for pumpestation Mejdal.

Svingningerne for pumpestation Borbjerg ses på figur 8.14. Det ses, at svingningsforløbet ved den første måling stemmer godt overens, men at det modsatte er gældende ved den anden måling, hvor trykket udjævnes for hurtigt.



Figur 8.14: Gengivelse af svingningsforløbet for pumpestation Borbjerg.

Modellen gengiver i visse tilfælde svingningsforløbet godt, men sommetider er der næsten ingen svingning, og trykket stabiliseres for hurtigt. Via svingningsanalysen er svingningstiderne fundet, hvoraf trykbølgens forplantningshastighed kan beregnes.

#### 8.4.4 Trykbølgens forplantningshastighed

Trykbølgens forplantningshastighed er for de enkelte målinger beregnet ud fra ekstremapunkterne samt svingningstiden, hvilket ses i tabel 8.3.

Pumpestation		Egensevej	Syrenvej	Staby Tvis		Mejdal	Borbjerg
1 måling	$c_e   [\mathrm{m/s}]$	$396,\!55$	437,78	$271,\!53$	$1.650,\!26$	$69,\!34$	$673,\!08$
1. manng	$c_s   [{\rm m/s}]$	$395,\!45$	$430,\!94$	$1.061,\!90$	$1.145,\!70$	$51,\!17$	$642,\!07$
0 maålin m	$c_e   [\mathrm{m/s}]$	415,19	442,27	$264,\!48$	1.800,28	$70,\!47$	1.826, 92
2. manng	$c_s   [\mathrm{m/s}]$	419,28	438,20	$759,\!48$	341,22	$68,\!07$	1.269,55
2	$c_e  [\mathrm{m/s}]$	429,53	441,16		$19.803,\!10$		
J. maning	$c_s   [\mathrm{m/s}]$	$242,\!51$	435,75		$343,\!94$		
4. måling	$c_e   [\mathrm{m/s}]$		448,18				
	$c_s   [\mathrm{m/s}]$		$426,\!23$				

Tabel 8.3: Trykbølgens forplantningshastighed fundet ud fra ekstremapunkter,  $c_e$ , og ud fra svingningstiden,  $c_s$ .

Det ses ved pumpestation Egensevej, at værdierne for trykbølgens forplantningshastighed for måling nr. 1, 2 og 3 er varierende. For enkelt hver måling er de beregnede forplantningshastigheder, fundet ved de to metoder, næsten ens, på nær ved den tredje måling, hvilket skyldes, at analysemodellen havde svært ved, at gengive det målte svingningsforløb. Trykbølgens forplantningshastighed beregnet for pumpestation Syrenvej er i målingerne næsten ens. Ud fra værdierne ses det ikke umiddelbart, hvilke målinger der er foretaget med hhv. pumpe 1 og pumpe 2.

For pumpestation Staby ses det, at trykbølgens forplantningshastighed fundet ved svingningsanalysen,  $c_s$ , er tre til fire gange større den tilsvarende hastighed fundet ved ekstremapunkter,  $c_e$ . Dette skyldes, at analysemodellen har svært ved at gengive svingningsforløbet via svingningsanalysen, og dermed findes en forkert værdi af svingningstiden. Det modsatte gør sig gældende for pumpestation Tvis, hvor  $c_e$  er større end  $c_s$ , hvilket skyldes, at det ikke er et reelt pumpestop, der er fundet, som vist på figur 8.6. Trykbølgens forplantningshastighed fundet ved pumpestation Mejrup og pumpestation Borbjerg er for de enkelte målinger tilsvarende.

Generelt ses det, at metoderne næsten finder den samme værdi af trykbølgens forplantningshastighed, men i de tilfælde, hvor svingningsanalysen ikke er i overensstemmelse med det målte tryk, er hastigheden fundet via ekstremapunkter mest korrekt. Dette skyldes, at selvom svingningsanalysen ikke er gengivet, finder analysemodellen ekstremapunkterne, hvorved svingningstiden estimeret ved ekstremapunkter er mest passende.

De fundne værdier af trykbølgens forplantningshastighed, pumpestart og tiden, som pumpen har kørt, benyttes som konstanter i en numerisk model, der gengiver trykmålingerne for pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej.

### 8.5 Vurdering af analysemodellen

Analysemodellen finder de korrekte start- og stoptider samt en passende værdi af trykbølgens forplantningshastigheden til pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej. Dette var også forventet, idet analysemodellen er opsat efter trykmålingerne fra disse pumpestationer. Ved validering af analysemodellen mod trykmålingerne foretaget på de resterende pumpestationer ses det, at de rigtige stoptidspunkter findes i de fleste tilfælde. Det samme gør sig ikke gældende ved starttider, idet analysemodellen fejlagtigt finder et starttidspunkt i svingningsforløbet af trykstød efter pumpestop. I de tilfælde hvor de rigtige start- og stoptider er fundet, finder analysemodellen start- og driftstryk der stemmer overens med trykmålingerne.

I modellen er svingningsforløbet efter pumpestop analyseret og forsøgt at gengive. Analysemodellen kan for halvdelen af målingerne gengive svingningsforløbet. En værdi af trykbølgens forplantningshastighed findes for alle trykmålingerne. I nogle tilfælde er trykbølgens forplantningshastighed fundet ved svingningsanalysen ikke korrekt, men der finder modellen en passende værdi ud fra ekstremapunkter.

De opsatte betingelser for pumpestart skal optimeres. For de tilfælde, hvor de rigtige starttidspunkter er fundet, vurderes det, at der via analysemodellen kan bestemmes pumpeslid og ændring i trykledningens ruhed. En ændring af trykbølgens forplantningshastighed kan ligeledes findes, hvoraf tilstedeværelsen af en luftlomme kan diagnosticeres.

# Del IV

# Numerisk modellering af trykvariation

# Numerisk model

Trykmålingerne foretaget på pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej gengives i en computerbaseret numerisk model opbygget i programmet Delphi. Modellen opstilles som en to dimensional eksplicit model, hvor trykket og vandhastigheden beregnes ud fra karakteristikmetoden. I modellen indtastes data om tidspunktet for pumpestart, tiden, som pumpen har kørt, samt trykbølgens forplantningshastighed fundet via analysemodellen. Opbygning af den numeriske model er beskrevet i de følgende afsnit, som omhandler opbygning af pumpekarakteristikken, pumpestart, pumpestop og luft i pumpesystemet.

#### 9.1 Pumpekarakteristik

Starttrykket ved opstart af en pumpe kan forandres over tid ved en ændring af en pumpes karakteristik. Det antages, at pumpekarakteristikken for de målte pumper alle har et forløb svarende til en parabel. Pumpekarakteristikken for centrifugalpumperne er i projektet simplificeret til en andengradsligning med tre konstanter, se ligning 9.1.

$$H = omdr^2 \cdot B_1 + omdr \cdot B_2 \cdot Q + B_3 \cdot Q^2 \tag{9.1}$$

hvor

Hløftehøjde 
$$[mH_2O]$$
omdrrelativ omdrejningstal  $[-]$  $B_1, B_2, B_3$ konstanterQvolumenstrøm  $[m^3/h]$ 

Det antages, at frekvensen igennem pumpemotoren ved opstart er 40 % af den maksimale frekvens af vekselstrøm igennem motoren. Dette medfører, at omdrejningstallet i ligning 9.1 starter på 0,40 og kører op til 1,00. Ved pumpestop i den numeriske model kører omdrejningstallet fra 1,00 til 0,40.

Pumpeslid i form af volumetriske tab eller friktionstab vil illustreres ved en ændring af de tre konstanter  $B_1$ ,  $B_2$  og  $B_3$ . Hvorvidt ændringen skyldes slid i pumpehjulet, lejer eller tætninger kan ikke direkte aflæses ud fra konstanterne. Værdien af konstanterne findes ved at tilpasse et beregnet tryk til det målte tryk. For at beregne trykket opsættes pumpestart og pumpestop i den numeriske model.

### 9.2 Pumpestart

Til opbygning af pumpestart i den numeriske model antages det, at pumpen starter hurtigt op, selvom dette ofte ikke er tilfældet. I kapitel 7 er trykmålingerne beskrevet, hvor pumperne startede op på et til to sekunder eller via en softstarter. Trykledningerne i pumpestationerne var tilstrækkelig lange til, at trykbølgen ikke når ud til ledningens endepunkt og retur, inden pumperne nåede det fulde omdrejningstal. Herved kan antagelsen om, at pumpen opstartes hurtigt accepteres.

Pumpestart opsættes via grundlæggende strømningsligninger, som løses via karakteristikmetoden. Karakteristikmetoden er en metode til at omskrive partielle afledede differentialligninger til ordinær differentialligninger. Pumpestarten er opbygget ud fra en fysisk antagelse om, at tryk- og hastighedsændringer forplanter sig med trykbølgens forplantningshastighed c, samt at tryk- og hastighedsændringer ved pumpestart bestemmes via Joukowskys formel. I Joukowskys formel medtages friktion med rørvæggen i form af modstandsformlen, se ligning 9.2. [Larsen, 2000; Brorsen og Larsen, 2007; Wylie og Streeter, 1985]

$$\Delta H = \pm \frac{c}{g} \cdot \Delta V \pm f \cdot \frac{\Delta V^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot R} \tag{9.2}$$

hvor

Friktionstallet beregnes via Colebrook & Whites formel, se ligning A.5 på side 109, og hydraulisk radius findes af ligning A.4 på side 108. Friktionstallet beregnes i hvert beregningspunkt ud fra hastigheder beregnet i det foregående tidsskridt.

Tryk- og hastighedsændringerne beregnes til hvert tidsskridt, hvor størrelsen af tidsskridtene  $\Delta t$  sættes til 0,2184 s, hvilket er måleintervallet af tryktransduceren jf. afsnit 7.1.

Trykledningen inddeles i bokse af størrelsen  $\Delta x$ , som beregnes via Courant tallet,  $C_N$ , for at minimere numerisk dispersion samt sikre stabilitet af det numeriske skema, se ligning 9.3 [Burrows og Qiu, 1995].

$$C_N = \left| c \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \right| \le 1 \tag{9.3}$$

Karakteristikmetoden forudsætter at  $C_N = 1$ , hvorved dette forhold benyttes i modellen. Via størrelsen af  $\Delta x$  findes antallet af beregningspunkter, *n*, via ligning 9.4. [Larsen, 2000]

$$n = \frac{L}{\Delta x} + 1 \tag{9.4}$$

Antallet af beregningspunkter, n, afrundes til nærmeste heltal.

Karakteristikmetoden er opstillet, så tryk- og hastighedsændringer beregnes langs karakteristikker i et x-t-plan, hvilket ses på figur 9.1. Begyndelsesbetingelsen er, at hastigheden i alle punkter er lig nul, og at trykniveauet er lig den geometriske løftehøjde,  $H_{geo}$ , i alle beregningspunkter. På den øvre rand bestemmes trykket ud fra pumpekarakteristikken, mens randbetingelsen på den nedre rand er, at trykket er lig den geometriske løftehøjde.



Figur 9.1: Karakteristikmetoden.

Trykniveauet og hastigheden bestemmes i hvert punkt, P, ud fra to punkter fra forrige tidsskridt, punkt Q og punkt S, via de karakteristiske linjer C<sup>+</sup> og C<sup>-</sup>. Linjerne beregnes

ud fra sammenhængen mellem trykniveauet og hastigheden i trykledningen opstillet i ligning 9.2, hvoraf ligning 9.5 beskriver  $C^+$ , og ligning 9.6 beskriver  $C^-$ . [Larsen, 2000]

$$H_P - H_Q = -\frac{c}{g} \cdot (V_P - V_Q) - f \cdot \frac{V_Q \cdot |V_Q| \cdot \Delta x}{2 \cdot g \cdot R}$$

$$(9.5)$$

$$H_P - H_S = \frac{c}{g} \cdot (V_P - V_S) + f \cdot \frac{V_S \cdot |V_S| \cdot \Delta x}{2 \cdot g \cdot R}$$

$$(9.6)$$

hvor

$$\begin{array}{c|c} H_P, \, H_Q, \, H_S \\ V_P, \, V_Q, \, V_S \end{array} \ \ \, \mbox{trykniveau i punkterne } P, \, Q \mbox{ og } S \ \ \, \mbox{[m]} \\ \mbox{hastighed i punkterne } P, \, Q \mbox{ og } S \ \ \, \mbox{[m/s]} \end{array}$$

Hastigheden på den nedre rand,  $V_p[n]$ , bestemmes ud fra ligning 9.5, hvor trykket på randen,  $H_p[n]$  er lig den geometriske løftehøjde. Sammenskrives de to ligninger, kan trykket og hastigheden i punkterne mellem den øvre rand og den nedre rand findes af ligning 9.7 og ligning 9.8. [Larsen, 2000]

$$H_P[n] = \frac{H_Q + H_S}{2} + \frac{c \cdot (V_Q - V_S)}{2 \cdot g} + \frac{c \cdot f \cdot \Delta t \cdot (V_S \cdot |V_S| - V_Q \cdot |V_Q|)}{4 \cdot g \cdot R}$$
(9.7)

$$V_P[n] = \frac{V_Q + V_S}{2} + \frac{g \cdot (H_Q - H_S)}{2 \cdot c} - \frac{f \cdot \Delta t \cdot (V_S \cdot |V_S| + V_Q \cdot |V_Q|)}{4 \cdot R}$$
(9.8)

Trykket på den øvre rand bestemmes ud fra skæringen mellem pumpekarakteristikken og ligning 9.6. Skæringspunktet findes ved iteration af ligning 9.9, hvor omdrejningstallet stiger fra 0,40 til 1,00 i tiden, det tager pumpen at køre op, se tiden på ramperne i kapitel 7. Trykket findes ved iteration med bisektionsmetoden, hvor værdien af volumenstrømmen Q justeres. Når en passende Q er fundet, beregnes  $H_P[1]$  via andengradsligningen for pumpekarakteristikken angivet i ligning 9.1.

$$omdr^{2} \cdot B_{1} + omdr \cdot B_{2} \cdot Q + B_{3} \cdot Q^{2}$$
$$-\left(H_{S} + \frac{c \cdot (Q/A - V_{S})}{g} + f \cdot \frac{V_{S} \cdot |V_{S}| \cdot \Delta x}{2 \cdot g \cdot R}\right) = 0$$
(9.9)

 $\operatorname{hvor}$ 

Q volumenstrøm fundet ved iteration  $[m^3/s]$ 

Hastigheden på øvre rand findes ved brug af kontinuitetsligningen, se ligning 9.10. [Brorsen og Larsen, 2007]

$$Vp[1] = \frac{Q}{A} \tag{9.10}$$

#### 9.3 Pumpestop

Pumpestop simuleres på samme måde som pumpestart, hvor omdrejningstallet i ligning 9.9 ændres som følge af rampen ved stop fra 1,00 til 0,40. Ved pumpestop kan der opstå undertryk i pumpesystemet. Undertryk forekommer, hvis trykket når under det aktuelle damptryk, hvorved væsken fordamper. De dannede dampbobler vil ved trykstigning implodere og skabe støj i pumpesystemet. I modellen tages der ikke hensyn til kavitationens indflydelse på pumpesystemet og trykket, hvilket medfører, at det beregnet tryk ved kavitation ikke er korrekt.

Ved pumpestop opstår der større trykvariationer end ved pumpestart, hvilket skyldes, at dæmpningen er mindre, fordi vandhastigheden er mindre. Når pumpen stopper, og omdrejningstallet mindskes, ændres pumpekarakteristikken. Hvis der via iteration af ligning 9.9 ikke kan findes et skæringspunkt mellem pumpekarakteristikken og Joukowskys formel med friktion, findes trykket af ligning 9.6, hvor randbetingelsen på øvre rand er, at vandhastigheden er lig nul. Når vandhastigheden ved pumpen bliver negativ, lukker en kontraventil for tilbagestrømning, således at randbetingelsen ved pumpen er, at hastigheden er lig nul ( $V_P = 0$ ).

Hvis trykket derimod er negativ, bliver vandhastigheden positiv, jf. afsnit 5.1.2, hvorved trykket sættes lig nul ( $H_P = 0$ ), og vandhastigheden findes af ligning 9.11. [Larsen, 2000]

$$V_P = V_S + \frac{c}{g} \cdot \left( H_P - H_S - f \cdot V_S \cdot |V_S| \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot g \cdot R} \right)$$
(9.11)

Randbetingelsen på den nedstrøms rand er den samme som ved pumpestart, hvilket er, at trykniveauet i det sidste beregningspunkt er lig den geometriske løftehøjde.

### 9.4 Luftlomme

Luftlommer samles, som beskrevet i afsnit 3.2, i toppunkter og ved markante ændringer af hældningen på trykledningen. En luftlomme kan reducere trykket, idet en luftlomme øger væskens elasticitet. For at simulere en luftlomme i den numeriske model antages det, at trykbølgens forplantningshastighed er konstant under beregningen. Ligeledes antages det, at luften samles i et beregningspunkt, og ikke på en ledningsstrækning mellem to punkter.

Luftlommens størrelse og placering er svær at måle. Luftlommens placering kan estimeres ved at observere svingningerne i trykledningen, idet svingningstiden ændres ved tilstedeværelsen af en luftlomme. Idet luftlommens vandring er langsom sammenlignet med vandringen af trykstød, antages det, at luftlommen forbliver i samme placering under målingen. Luftlommens størrelse kendes ikke, men af fysiske årsager indsættes betingelsen, at luftlommens volumen altid er større eller lig nul. Samtidig antages det, at luftlommen ikke separerer vandsøjlen, dvs. at luftlommen ikke udfylder hele tværsnitsarealet af trykledningen. Der ses bort fra en ændring af friktionen som følge af luftlommen, derfor beregnes luftlommens tværgående udstrækning ikke.

Det antages, at væsken forbliver homogen, dvs. at væsken ikke optager eller frigiver luft under beregningen. Trykket i luftlommen antages at være konstant over luftlommens volumen. Gassen i luftlommen antages at følge den polytropiske proces angivet i ligning 9.12, hvor den polytropiske eksponent, n, er 1 ved en isoterm proces og 1,4 ved en adiabatisk proces. En isoterm proces vil sige, at temperaturen i luftlommen holdes konstant, hvilket er tilfældet for luftlommer med en hurtig responstid. En adiabatisk proces er, når der ingen energi udveksling er med omgivelserne, hvilket ofte er tilfældet i pumpesystemer med en stor vandvolumen og en lille luftvolumen. [Burrows og Qiu, 1995; Wylie og Streeter, 1985]

$$H_A \cdot Vol^n = C_0 \tag{9.12}$$

hvor

 $\begin{array}{c|c} H_A & \text{absolut tryk} & [\text{mH}_2\text{O}] \\ Vol & \text{luftvolumen} & [\text{m}^3] \\ C_0 & \text{konstant} \end{array}$ 

Luftvolumenet, Vol, estimeres ud fra et startgæt af  $C_0$ . Ved design af pumpesystemer sættes den polytropiske eksponent, n, ofte til et gennemsnit på 1,2, hvilket derfor også gøres i den numeriske model [Wylie og Streeter, 1985]. Det absolutte tryk findes ved en funktion af trykket i beregningspunktet, det atmosfæriske tryk samt koten i beregningspunktet, hvorved ligningen kan omskrives til ligning 9.13. [Burrows og Qiu, 1995]

$$(H_P + H_{atm} - Z_i) \cdot (Vol_i + \Delta Vol_i)^n = C_0$$
(9.13)

hvor

$$\begin{array}{ll} H_P & \mbox{tryk ved luftlomme } [\rm mH_2O] \\ H_{atm} & \mbox{atmosf}\mbox{atmosf}\mbox{erisk tryk } [\rm mH_2O] \\ Z_i & \mbox{kote for beregningspunkt med luft } [\rm m] \end{array}$$

Indekset P indikerer en ukendt variabel til det næste tidsskridt, dvs.  $t + \Delta t$ . I beregningspunktet med luft, findes der to værdier af volumenstrømmen, hhv. en opstrøms og en nedstrøms for luftlomme, hvilket er markeret med indekserne *op* og *ned*. En ændring af luftvolumen findes ved kontinuitetsligningen, hvilket ses i ligning 9.14. [Burrows og Qiu, 1995]

$$\Delta Vol_i = \frac{(Q_{P,ned} - Q_{P,op}) + (Q_{ned} - Q_{op})}{2}$$
(9.14)

De ukendte variable til næste tidsskridt,  $H_P$ ,  $Q_{P,op}$  og  $Q_{P,ned}$ , findes ved at opstille tre ligninger med tre ubekendte, hhv. ligning 9.13 og to ligninger opstillet ud fra karakteristikmetoden, ligning 9.15 og ligning 9.16. [Burrows og Qiu, 1995]

$$H_{P,op} = C_{(+)} - B_{op} \cdot Q_{P,op} \tag{9.15}$$

$$H_{P,ned} = C_{(-)} + B_{ned} \cdot Q_{P,ned}$$
(9.16)

hvor

 $\begin{array}{c|c} B & \text{konstant } [\text{s/m}^2] \\ C_{(+)} & \text{konstant } [\text{m}] \\ C_{(-)} & \text{konstant } [\text{m}] \end{array}$ 

Konstanten B findes af ligning 9.17, hvor værdierne til trykbølgens forplantningshastighed, c, og tværsnitsarealet, A, findes hhv. nedstrøms og opstrøms for luftlommen [Burrows og

Qiu, 1995]. Idet trykbølgens forplantningshastighed er konstant i beregningen samt, at tværsnitsarealet er ens i hele ledningsstrækningen er  $B_{op} = B_{ned} = B$ . [Burrows og Qiu, 1995]

$$B = \frac{c}{g \cdot A} \tag{9.17}$$

 $C_{(+)}$  og  $C_{(-)}$  er konstanter fra karakteristikmetoden og findes af ligning 9.18 og ligning 9.19, hvor volumenstrømmen og trykket i beregningspunkterne opstrøms og nedstrøms for beregningspunktet med luft medregnes. Beregningspunktet opstrøms er indikeret med indekset i-1, mens beregningspunktet nedstrøms for luftlommen har indekset i+1. [Burrows og Qiu, 1995]

$$C_{(+)} = H_{i-1} + B \cdot Q_{i-1} - \frac{f_{i-1} \cdot \Delta x}{2 \cdot g \cdot R \cdot A^2} \cdot Q_{i-1} \cdot |Q_{i-1}|$$
(9.18)

$$C_{(-)} = H_{i+1} - B \cdot Q_{i+1} + \frac{f_{i+1} \cdot \Delta x}{2 \cdot g \cdot R \cdot A^2} \cdot Q_{i+1} \cdot |Q_{i+1}|$$
(9.19)

Det antages, at tryktabet over beregningspunktet *i* er minimal, hvorved  $H_{P,op} = H_{P,ned} = H_P$ . Via denne antagelse samt ved indsættelse af ligning 9.15, 9.16, 9.18 og 9.19 i ligning 9.13, fås den ikke-lineær ligning 9.20, hvoraf trykket  $H_P$  kan findes ved iteration. [Burrows og Qiu, 1995]

$$\left( Vol_i + \frac{\Delta t(Q_{i,ned} - Q_{i,op})}{2} - \frac{\Delta t(B_{op} \cdot C_{(-)} + B_{ned} \cdot C_{(+)})}{2 \cdot (B_{op} \cdot B_{ned})} + \frac{\Delta t(B_{op} + B_{ned})}{2 \cdot (B_{op} \cdot B_{ned})} \cdot H_P \right)^n \cdot (H_P + H_{atm} - Z_i) = C_0$$
(9.20)

#### 9.5 Opsætning af den numeriske model i Delphi

Koden til den numeriske model er opbygget i Delphi og kan ses i bilag 17 og bilag 18. Den numerisk model i bilag 17 er uden en luftlomme, mens modellen i bilag 18 indeholder en luftlomme. Fremgangsmåde i modellerne er:

- Indlæsning af konstanter
- Indlæsning af txt-filer
- Beregning af hjælpestørrelser
- Definition af begyndelsesbetingelser

- Tidsløkke til beregning af tryk
  - Reynolds tal og friktionstal beregnes
  - Pumpens omdrejningstal beregnes
  - Trykket i første beregningspunkt findes ved iteration
    - Hvis ventilen er lukket, sættes trykket lig nul
  - Trykket beregnes i de resterende beregningspunkter

I modellen med luftlomme findes trykket i beregningspunktet med luft ved iteration

- Gamle værdier udskiftes med nye
- Resultaterne udskrives

For at køre modellen skal værdierne til pumpekarakteristikken, trykledningens ruhed samt luftlommens størrelse og placering bestemmes.

## 9.6 Bestemmelse af pumpekarakteristik, ruhed og luft

Trykket målt på pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej gengives i to numeriske modeller:

- en model uden luft, hvor trykket målt på pumpestation Syrenvej simuleres. Modellen kan findes i bilag 17.
- en model med luft, hvor trykket målt på pumpestation Egensevej simuleres. Modellen kan findes i bilag 18.

Værdien af konstanterne i pumpekarakteristikken, ruheden i trykledningen samt luftlommens placering og størrelse bestemmes ved sammenligning med det målte tryk. Konstanterne er i projektet estimeret ved to metoder:

- Kalibrering, hvor de mest passende værdier til konstanterne findes ved sammenligning med det målte tryk ved mindste kvadraters metode, se ligning 8.7 på side 58.
- Manuel tilpasning af konstanterne, hvor det beregnede tryk grafisk sammenlignes med det målte tryk.

Først findes konstanterne ved kalibrering, hvorefter det vurderes, hvorvidt det målte tryk og det beregnede tryk er sammenlignelige. Herefter foretages tilpasning af konstanterne, hvor der ændres lidt på værdien af konstanterne. I modellerne er trykbølgens forplantningshastighed sat lig værdien fundet ved svingningsanalysen, se  $c_s$  i tabel 8.3 på side 67, på nær ved tredje måling på pumpestation Egensevej, hvor trykbølgens forplantningshastighed fundet via ekstremapunkter,  $c_e$ , er benyttet.

#### 9.6.1 Bestemmelse af konstanter via kalibrering

For pumpestation Syrenvej, hvor der ingen luftlomme er, kalibreres de tre konstanter i pumpekarakteristikken,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ , samt ruheden i trykledningen, k.

Pumpestation Egensevej, hvor der under målingen var en mistanke om luft i pumpesystemet, kalibreres for yderlige tre konstanter, hvilke er luftlommens placering i længderetning  $X_{Luft}$ og kote  $Z_i$  samt luftlommens størrelse  $C_0$ .

De kalibrede konstanter findes ved mindste kvadraters metode af to omgange:

- 1. Den minimale afvigelse fra det målte tryk findes ved opsættelse af et firedimensional og et syvdimensional grid til hhv. modellen uden luft og modellen med luft, hvor hver akse er en af konstanterne. I modellen uden luftlomme er der ti værdier af konstanter, dvs. 10<sup>4</sup> beregningspunkter. I modellen med luft er der fire værdier af konstanterne  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  og k, tre værdier til konstanterne  $Z_i$  og  $C_0$  samt alle beregningspunkterne i længderetningen til  $X_{Luft}$ . Modellen med luft udgøres derfor af  $4^4 \cdot 3^2 \cdot n$  beregningspunkter, hvor n er antallet af stedsskridt. Værdierne til punktet med den mindste afvigelse bruges som startværdier til den anden del af kalibrering.
- 2. Ud fra de fundne startværdier til konstanterne findes mere præcise værdier af konstanterne ved at gå efter hældningen af den beregnede afvigelse. Dvs. at der tillægges eller fratrækkes lidt fra de syv konstanter således, at et minimum findes.

	Pumpestat	$B_1$	$B_2$	$B_3$	k	$X_{Luft}$	$Z_i$	$C_0$	
			[—]	[—]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]
-		mpestation $B_1$ [-]         [-]           1. måling         13,9           ensevej         2. måling         12,9           3. måling         12,4           1. måling         50,5           2. måling         20,4           3. måling         50,2           4. måling         32,9	464	-1.930	0,0009	$345,\!5$	$2,\!22$	$247,\! 6$	
	Egensevej	2. måling	$12,\!9$	440	-1.880	0,00135	183,1	$2,\!03$	$256,\!8$
		3. måling	$12,\!4$	520	-1.930	0,00085	$187,\! 6$	$1,\!92$	$172,\!5$
-		1. måling	50,5	-992	-3.020	0,0011			
	Suronuoi	2. måling	20,4	592	-7.120	0,00005			
	Syrenvej	3. måling	50,2	-1.000	-3.870	0,00085			
		4. måling	32,9	-1.504	90	0,0116			

Kalibrering af den numeriske model uden og med luftlomme kan findes i hhv. bilag 15 og bilag 16. Konstanterne fundet ved kalibrering ses i tabel 9.1.

Tabel 9.1: Konstanter til pumpekarakteristik, ruhed og luftlomme fundet ved kalibrering.

For pumpestation Egensevej ses det, at konstanter for de tre målinger er forholdsvis ens. Ruheden er varierende, selvom den burde være ens for de tre målinger. Placeringen af luftlommen,  $X_{Luft}$  er ligeledes forskellig, men det tyder på, at luftlommen er placeret i begyndelsen af trykledningen i en kote på ca. to meter over pumperne. Sammenlignes denne kote med længdeprofilet af trykledningen i appendiks B, ses det, at koten ved station 200-300 m ligger på 0,3-0,4 m, idet tryktransduceren målte i ca. to meters højde. Dvs. der via modellen findes et toppunkt, det ligger for højt i forhold til, hvordan trykledningen ligger.

Konstanterne i pumpestation Syrenvej er noget forskellige. Her kan det ses, at målingerne er foretaget med forskellige pumper. Konstanterne fundet til måling nr. 1 og nr. 3 er næsten identiske, hvilket er passende, idet samme pumpe er benyttet (pumpe nr. 1). Måling nr. 2 og nr. 4 afviger fra hinanden, til trods for at pumpe nr. 2 har kørt ved begge målinger. Afvigelsen kan skyldes, at der ved måling nr. 4 er ændret på rampen ved pumpestop. Ruheden er ligeledes varierende, selvom den burde være ens for alle målingerne.

Figur 9.2, 9.3 og 9.4 viser trykket simuleret med de beregnede konstanter for pumpestation Egensevej. Det ses, at det beregnede tryk er sammenfaldende med trykket målt, mens pumpen kører, men at der ingen svingninger er efter pumpestop. I måling nr. 2 og nr. 3 afviger trykket inden pumpestart, idet den numeriske model simulerer en trykstigning inden start af pumpen. Det beregnede tryk i måling nr. 2 er optegnet med en bred streg, hvilket skyldes, at trykket ikke er stabilt som følge af numerisk spredning.

Generelt stemmer det simulerede tryk ikke overens med det målte tryk, på nær trykniveauet ved start- og driftstrykket.



Figur 9.2: Målt og beregnet tryk for måling nr. 1 på pumpestation Egensevej. Det beregnede tryk er simuleret med de kalibrede konstanter.



Figur 9.3: Målt og beregnet tryk for måling nr. 2 på pumpestation Egensevej. Det beregnede tryk er simuleret med de kalibrede konstanter.



Figur 9.4: Målt og beregnet tryk for måling nr. 3 på pumpestation Egensevej. Det beregnede tryk er simuleret med de kalibrede konstanter.

På figur 9.5, 9.6, 9.7 og 9.8 ses trykket simuleret med de kalibrerede konstanter for pumpestation Syrenvej. Det beregnende tryk på figur 9.5 og figur 9.7 ligger højere end det målte tryk, hvilket til dels også er tilfældet på figur 9.8. På figur 9.6 ses det, at forløbet af det beregnede tryk er en ret linje uden hældning. Dette skyldes, at kalibreringen af konstanterne ved mindste kvadraters metode har fundet et lokalt minimum af afvigelse, hvorved det simulerede tryk slet ikke er sammenfaldende med det målte tryk.

Svingningsforløbene ved pumpestop er forskellige fra de målte svingningsforløb, og det tager længere tid, før trykket er dæmpet. Det ses, at svingningstiden er nogenlunde sammenfaldende i måling nr. 1 og nr. 3. I måling nr. 1 og nr. 3 er der "hakker" på svingningerne. Dette er en fejl, der opstår i modellen, når omdrejningstallet ved pumpestop ikke kører langt nok ned.



Figur 9.5: Målt og beregnet tryk for måling nr. 1 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med de kalibrede konstanter.



Figur 9.6: Målt og beregnet tryk for måling nr. 2 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med de kalibrede konstanter.



Figur 9.7: Målt og beregnet tryk for måling nr. 3 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med de kalibrede konstanter.



Figur 9.8: Målt og beregnet tryk for måling nr. 4 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med de kalibrede konstanter.

Generelt ses det, at simulering af trykket med de kalibrede konstanter ikke er sammenfaldende med det målte tryk, til trods for at modellen har fundet værdien af konstanterne ved mindste kvadraters metode. Dette tyder på, at modellen i kalibreringen har fundet lokale minimums punkter for afvigelse og ikke det globale minimum, hvilket giver forkerte værdier af konstanterne.

#### 9.6.2 Bestemmelse af konstanter ved manuel tilpasning

For at gengive et mere passende forløb af trykket for pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej, findes værdierne til konstanterne ved manuelt at tilpasse trykket. For at gøre dette, tages der udgangspunkt i værdierne fundet ved kalibrering, som tilpasses således, at det simulerede tryk stemmer overens med det målte tryk. På figur 9.9, 9.10 og 9.11 er trykmålingerne samt det simulerede tryk for pumpestation Egensevej vist. Nogle af konstanterne samt omdrejningstallet, som pumpen starter og stopper ved, er ændret i forhold til værdierne fundet ved kalibrering. Værdierne fundet ved tilpasning ses i tabel 9.2. Koten,  $Z_{Luft}$ , er ændret, således at højden stemmer overens med den stationering luftlommen er placeret i, jf. appendiks B.



Figur 9.9: Målt og beregnet tryk for måling nr. 1 på pumpestation Egensevej. Trykket er beregnet med konstanter fundet ved tilpasning.



Figur 9.10: Målt og beregnet tryk for måling nr. 2 på pumpestation Egensevej. Trykket er beregnet med konstanter fundet ved tilpasning.



Figur 9.11: Målt og beregnet tryk for måling nr. 3 på pumpestation Egensevej. Trykket er beregnet med konstanter fundet ved tilpasning.

Det ses på figurerne, at trykket beregnet med de tilpassede konstanter stemmer bedre overens med det målte tryk, end trykket beregnet med de kalibrerede konstanter i afsnit 9.6.1. Ved alle trykmålinger afviger det beregnet tryk lige efter pumpestart i forhold til målingerne. Det er i det målte tryk er en ekstra top, som ikke gengives korrekt i det beregnede tryk.

Det ses, at svingningerne ikke er helt sammenfaldende, idet det bagvedliggende svingningsforløb ikke gengives. Svingningerne er bedre gengivet med de tilpassede konstanter end de kalibrerede konstanter, hvilket til dels skyldes, at omdrejningstallet og konstanterne for luftlommen er ændret. Placeringen af luftlommen er flyttet til slutningen af trykledningen, og luftlommen er lavet mindre. Konstanterne fundet ved tilpasning ses i tabel 9.2. Efter pumpestop er der nu svingninger, hvor svingningstiden passer, men svingningerne er lidt tidsforskudte. Amplituden af svingningerne er ikke sammenfaldene med de målte svingninger, og det første trykstød efter pumpestop er ikke gengivet.

Pumpestation		$B_1$	$B_2$	$B_3$	k	$X_{Luft}$	$Z_i$	$C_0$	Omdr
		[—]	[—]	[—]	[m]	[m]	[m]	[-]	
Egensevej	1. måling	10,0	280	-1.930	$0,\!006$	1.500	$2,\!22$	20	0,10
	2. måling	$12,\!0$	250	-1.880	$0,\!015$	1.600	$2,\!03$	70	$0,\!20$
	3. måling	8,0	300	-1.930	$0,\!005$	1.500	$1,\!92$	20	$0,\!10$
Syrenvej	1. måling	35,0	-700	-3.020	0,01				0,20
	2. måling	$_{30,0}$	-1.000	-2.000	$0,\!01$				
	3. måling	37,0	-1.000	-3.870	$0,\!01$				$0,\!20$
	4. måling	29,5	-1.100	90	0,0116				$0,\!05$

Tabel 9.2: Konstanter til pumpekarakteristik, ruhed og luftlomme fundet ved kalibrering og manuel tilpasning. Konstanter markeret med rødt er ændret via tilpasning af trykket til det målte tryk.

På pumpestation Syrenvej er omdrejningstallet og konstanterne ligeledes fundet ved manuel tilpasning for at beregne et tryk, der er i bedre overensstemmelse med det målte tryk. Konstanterne fundet ved tilpasning af trykket ses i tabel 9.2. Det beregnede tryk med de ændrede konstanter ses på figur 9.12, 9.13, 9.14 og 9.15.



Figur 9.12: Målt og beregnet tryk for måling nr. 1 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med konstanterne fundet ved tilpasning af trykket til det målte tryk.



Figur 9.13: Målt og beregnet tryk for måling nr. 2 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med konstanterne fundet ved tilpasning af trykket til det målte tryk.



Figur 9.14: Målt og beregnet tryk for måling nr. 3 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med konstanterne fundet ved tilpasning af trykket til det målte tryk.



Figur 9.15: Målt og beregnet tryk for måling nr. 4 på pumpestation Syrenvej. Det beregnede tryk er simuleret med konstanterne fundet ved tilpasning af trykket til det målte tryk.

Det ses på figurerne, at trykket simuleret med de tilpassede konstanter stemmer bedre overens med det målte tryk, end trykket beregnet med de kaliberede konstanter vist på figurerne i afsnit 9.6.1. "Hakkene" ved svingningerne efter pumpestop er forsvundet, idet omdrejningstallet ved pumpestop er mindsket. Svingningsforløbet passer fint, men dæmpes ikke så hurtigt som i trykmålingerne.

### 9.7 Vurdering af den numeriske model

Via den numeriske model er det forsøgt at gengive trykmålingerne. Dette er gjort ved både at finde konstanterne til pumpekarakteristikken, trykledningens ruhed og en luftlomme via kalibrering og manuel tilpasning.

Det simulerede tryk ved beregning med konstanterne fundet ved kalibrering stemmer ikke overens med det målte tryk. Det beregnede tryk afviger fra det målte tryk i både modellen uden luft og modellen med luft. Dette kan skyldes, at der er mange konstanter, der skal findes, hvorved det er svært at finde det rigtige optimum. Det vurderes hermed, at det ikke er mulig at finde konstanterne via kalibrering af den numeriske model.

En værdi af konstanterne er ligeledes estimeret, ved at tilpasse det beregnede tryk til det målte tryk. Dette giver et resultat, der er i bedre overensstemmelse med trykmålingerne end ved de kalibrede konstanter. Til trods for dette vurderes det, at det beregnede tryk stadig ikke gengiver det målte tryk.

Det vurderes derfor, at den numeriske model ikke er optimal til at finde pumpeslid, ændring i trykledningens ruhed samt en luftlomme i pumpesystemet.

# Bestemmelse af pumpeslid

På de udvalgte pumpestationer er trykket ved pumperne ikke målt i en længere varende periode, men kun ved en enkelt måling. Derfor har det ikke været muligt, at undersøge hvilken indvirkning de forskellige former for pumpeslid har på trykket.

Pumpestation Syrenvej er opført med to identiske pumper. Ved måling på pumperne den  $16/3\ 2012$  indikerede trykket, at der er en forskel på de to pumper. Trykledningen for de to pumper er den samme, hvorved det ikke er ruheden, der har en indflydelse på forskellen.

Via analysemodellen er start- og driftstrykket fundet ud fra trykmålingerne. De fundne værdier af start- og driftstrykket ses på figur 10.1 og figur 10.2.



Figur 10.1: Starttryk for pumpestation Syrenvej fundet via analysemodellen.



Figur 10.2: Driftstryk for pumpestation Syrenvej fundet via analysemodellen.

Det ses, at starttrykket for pumpe nr. 1 er ca. 16 % lavere end starttrykket for pumpe nr. 2. Det samme gælder for driftstrykket, hvor pumpe nr. 1 leverer et tryk, der er 15 % lavere end ved pumpe nr. 2. Problemet kunne skyldes luft i pumpen, hvilket blev observeret under måling nr. 2. Det lavere tryk er konstant under hele måling nr. 2 og måling nr. 4, se figur 7.11 på side 39, hvorved det sandsynligvis ikke er en luftansamling i pumpen, der giver den lavere ydelse. En luftansamling i trykledning er ligeledes ikke sandsynlig, idet dette også ville have indvirkning på trykket ved kørsel med pumpe nr. 2.



På figur 10.3 ses en sammenligning af måling nr. 1 og måling nr. 2.

Figur 10.3: Sammenligning af trykket målt via pumpe nr. 1 og nr. 2 på pumpestation Syrenvej. Pumpe nr. 1 kørte under måling nr. 2, mens pumpe nr. 2 kørte ved måling nr. 1. Det ses, at der en forskel i trykniveauet, men at svingningstiden efter pumpestop er ens.

Det ses, at forskellen i trykket er konstant over hele målingen. Ligeledes ses det, at svingningsforløbet efter pumpestop er ens samt, at svingningstiden er identisk. Svingningstiden for de to målinger er via analysemodellen fundet til 18,1 s og 17,8 s for hhv. måling nr. 1 og nr. 2. Idet dæmpningen af trykstød sker ved samme hastighed samt at svingningstiden er ens i de to målinger, bekræfter det, at det ikke er luft i pumpesystemet, der forringer pumpeydelsen. Trykmålingen viser, hvad effekt en slidt pumpe har på trykket.

På figur 10.4 er pumpekarakteristikken gengivet for de fire målinger foretaget på Syrenvej. Pumpekarakteristikken er optegnet via de tre konstanter  $B_1$ ,  $B_2$  og  $B_3$  bestemt via manuel tilpasning, hvilket er beskrevet i afsnit 9.6.2.



Figur 10.4: Pumpekarakterstik for de fire målinger. Pumpekarakterstikken er optegnet via konstanterne fundet ved manuel tilpasning. Ved måling nr. 1 og nr. 3 har pumpe nr. 2 kørt, mens pumpe nr. 1 kørte ved måling nr. 2 og nr. 4.

På figuren ses det, at pumpekarakteristikken for måling nr. 1 og nr. 3 er forholdsvis ens. Det samme gør gældende for pumpekarakteristikken for måling nr. 2 og nr. 4. Dette viser, at ydeevnen for pumpe nr. 1 er faldet. Dette stemmer overens med figur 5.3 på side 22, som illustrerer, at pumpekarakteristikken for en slidt pumpe vil ligge lavere end ved en ny pumpe.

Den opsatte model kan finde en ændring af konstanterne, men som det ses på figur 10.4, kan pumpekarakteristikken for den samme pumpe være tilpasses til et lidt forskelligt forløb. Ved diagnosticering af en slidt pumpe skal der være en væsentlig forskel på konstanterne for, at pumpen kan antages at være slidt.

# Bestemmelse af en ændring i trykledningens ruhed

Trykket er i dette projekt ikke målt på samme pumpestation før og efter rensning af trykledningen med en rensegris. I 2008 er trykket målt før og efter en rensning på en pumpestation i Borum, beliggende vest for Århus [Borg, 2008]. Resultat af denne måling ses på figur 11.1.



Figur 11.1: Målt tryk for en pumpestation i Borum hhv. før og efter rensning af trykledningen med en rensegris. [Borg, 2008]

Det ses på figuren, at rensningen med rensegrisen har en indflydelse på trykmålingerne. Svingningerne efter pumpestop er mere markante ved den rensede situation. Dette skyldes, at modstanden er mindre, hvorved udsvingene bliver større. Ruheden er beregnet til 5,22 mm før indsættelse af en rensegris. Efter rensegrisen er ruheden beregnet til 0,24 mm. [Borg, 2008]

På figur 11.1 ses det, at starttrykket er ens før og efter rensningen, hvilket var forventet, idet pumpen ikke er ændret væsentligt i tiden mellem de to trykmålinger. Ligeledes ses det, at driftstrykket bliver mindre ved den rensede situation, hvilket stemmer overens med teorien vist på figur 5.4 på side 22. Indtegnes starttrykket og driftstrykket for de to trykmålinger ind i en tilfældig pumpekarakteristik, fås situationen vist på figur 11.2.



Figur 11.2: Ændring af ledningskarakteristikken som følge af en ændret ruhed i trykledningen.

På figuren ses det, hvilken indflydelse en større ruhed har på ledningskarakteristikken og dermed trykket.

Trykmålingerne foretaget på dette projekt på de enkelte pumpestationer har samme ruhed, idet målingerne er foretaget på samme dag. Til trods for dette, kan det ses i tabel 9.2 på side 85, at ruheden ikke er estimeret til den samme værdi i de enkelte pumpestationer, hvor der er op til en faktor tre i forskel. Via den numeriske model kan en ruhed findes via en manuel tilpasning, men idet der også er andre konstanter, der kan ændres på, som f.eks. pumpekarakteristikken, er det svært via modellen at estimere en ændring af ruheden. Til dette formål er det mere nøjagtig at se på den tidslige udvikling af driftstrykket, som illustreret på figur 11.1.

# Identifikation af en luftlomme

Tilstedeværelsen af luft i et pumpesystem har indflydelse på svingningstiden og størrelsen af trykstødene. På nogle af trykmålingerne foretaget på pumpestationerne indikerede trykket, at der var luft i pumpesystemerne. Via den numeriske model af pumpestation Egensevej er det forsøgt at genskabe en luftlomme, hvilket ses på figur 12.1.



Figur 12.1: Simuleret tryk for en situation med og uden en luftlomme. Trykbølgens forplantningshastighed er sat til den samme værdi i beregningerne, hvilket reelt ikke er tilfældet, idet en luftlomme vil påvirke trykbølgens forplantningshastighed.

På figuren er trykket ligeledes beregnet uden tilstedeværelsen af en luftlomme. Det ses, at den største forskel sker efter pumpestop, idet trykket i modellen med luft dæmpes hurtigere. Der er ligeledes en forskel, i tidsrummet mellem pumpens starttryk og indtil driftstrykket opnås, hvor trykket med luftlomme har et mere afrundet forløb. I tiden inden pumpestart er der noget støj, hvilket tilskrives luftlommen. En større luftlomme vil hurtigere dæmpe trykket, hvilket ses på figur 12.2, hvor luftlommen er en faktor ti større.



Figur 12.2: Beregnet tryk ved to forskellige størrelser af en luftlomme.

Metoden til beregning af luft i den numeriske model givet et tryk, der ikke er i overensstemmelse med det målte tryk, hvilket ses af svingningsforløbet efter pumpestop. Trykmålingerne viser en bagvedliggende svingning i trykket efter pumpestop. Dette er ikke gengivet i den numeriske model, hvilket tyder på, at det ikke er den mest optimale metode til simulering af en luftlomme.

Ved måling på pumpestationerne med luft i pumpesystemet er trykket ikke målt efter en udluftning af pumpesystemet. I en tidligere undersøgelse af en trykledning i Oue er der foretaget trykmålinger i en regnvejrsperiode og i en periode med tørvejr [Larsen og Burrows, 1992]. I regnvejrsperioden har volumenstrømmen til pumpestation været større, hvilket har medført, at en eventuel luftlomme er strømmet ud af pumpesystemet pga. længere driftstid af pumperne. Det modsatte er tilfældet i tørvejrsperioden, hvor luften har haft tid til at samle sig. Trykket målt i de to perioder ses på figur 12.3. [Larsen og Burrows, 1992]



Figur 12.3: Målt tryk i en 1.500 m lang trykledning i Oue, øst for Hobro. (a) trykket efter en periode med regnvejr. (b) trykket efter en tørvejrsperiode, hvor der er en luftlomme tilstede i pumpesystemet. [Larsen og Burrows, 1992]
Figur 12.3b viser, at luft i pumpesystemet har en markant indflydelse på svingningsforløbet af trykket, både mht. svingningstiden og hvor hurtigt trykket dæmpes, set i forhold til trykket på figur 12.3a. Ved en kontinuerlig beregning af trykbølgens forplantningshastighed vil det kunne afsløre, hvornår en luftlomme er tilstede i pumpesystemet.

Trykbølgens forplantningshastighed kan overvåges løbende via analysemodellen, hvor svingningstiden af trykstødene efter pumpestop bestemmes. En ændring af svingningstiden skyldes en ændring af trykbølgens forplantningshastighed. Ved udbygningen af den numeriske model med flere højdepunkter kan det bestemmes ved hvilke højdepunkter på ledningsstrækningen, at luftlommer er placeret.

### Konklusion

Hypotesen i dette projekt er, at et pumpesystems tilstand kan diagnosticeres ud fra trykket målt efter en pumpe. Det er antaget, at der ud fra trykket kan diagnosticeres pumpeslid, ændring af ruhed, luft, utætte kontraventiler, lækage og kavitation. I projektet er det kun undersøgt, om pumpeslid, ændring af ruheden og tilstedeværelsen af en luftlomme kan bestemmes.

For at verificere eller falsificere hypotesen er der i projektperioden foretaget trykmålinger på pumpestationer tilhørende Vestforsyning Spildevand A/S og Aalborg Forsyning, Kloak A/S. Under målingen af trykket på pumpestation Egensevej blev det observeret, at der var luft tilstede i pumpesystemet. Dette blev identificeret ud fra svingningsforløbet af trykket efter pumpestop, hvor en bagvedliggende svingning af trykket indikerede en luftlomme. På pumpestation Syrenvej, som udgøres af to identiske pumper, viste det målte tryk, at der var forskel på de to pumpers ydelse. Dette blev observeret, idet trykket målt ved kørsel af den ene pumpe var betydelig lavere.

Der er i projektperioden ikke foretaget trykmålinger før og efter en rensning af en trykledning. Ved undersøgelse af en trykmåling foretaget på en pumpestation i Borum kan det ses, at en ændring i trykledningens ruhed direkte kan aflæses af det målte tryk. Trykmålingen på pumpestationen i Borum viser, at starttrykket før og efter, at en rensegris har været igennem pumpesystemet, er uforandret, mens driftstrykket er mindsket efter rensning.

#### Analysemodel

Trykmålingerne er analyseret via en analysemodel, som estimerer start- og stoptrykket samt trykbølgens forplantningshastighed. Analysemodellen er opbygget ud fra trykmålingerne foretaget på pumpestationerne tilhørende Aalborg Forsyning, Kloak A/S. Modellen er valideret på baggrund af trykket målt på pumpestationerne tilhørende Vestforsyning Spildevand A/S. Valideringen viser, at modellen kun finder det rigtige tidspunkt for pumpestart og -stop ved halvdelen af trykmålingerne. Modellen finder ofte en tid for pumpestart i svingningsforløbet efter en pumpekørsel, hvilket giver anledning til et forkert estimat af starttrykket. Analysemodellen er ikke kalibreret yderligere, idet de sidste trykmålinger først blev foretaget i slutningen af projektperioden.

Via analysemodellen er start- og driftstrykket for målingerne foretaget på pumpestation Egensevej fundet. Værdierne af start- og driftstrykket bekræfter, at den ene pumpe på pumpestationen har en forringet ydelse.

#### Numerisk model

Via en numerisk model er det forsøgt at gengive trykket målt på pumpestationerne tilhørende Aalborg Forsyning, Kloak A/S. Dette er gjort ved opbygning af pumpestart og -stop samt trykstød efter pumpekørsel i den numeriske model. Konstanter til modellen er fundet ved kalibrering samt ved at tilpasse det beregnede tryk til det målte tryk. Til trods for er trykket beregnet via den numeriske model ikke i overensstemmelse med det målte tryk. Det konkluderes derfor, at den numeriske model ikke kan benyttes til at gengive trykmålingerne, og dermed kan problemer i pumpesystemer ikke diagnosticeres via modellen.

Selvom modellerne ikke direkte kan benyttes, er pumpeslid, aflejringer i trykledninger og luft i et pumpesystem diagnosticeret ud fra trykket målt på pumpestationerne. Det konkluderes derfor, at hypotesen er verificeret for emnerne: diagnosticering af pumpeslid, diagnosticering af ændring i ruheden og diagnosticering af luftlommer.

### Perspektivering

Af tidsmæssige årsager er diagnosticering af kavitation, utæt kontraventil og lækage ikke undersøgt nærmere i dette projekt. Ved en videre undersøgelse kan det være interessant, at se om tilstandene kan analyseres via en model.

De simulerede trykstød efter pumpestop dæmpes ikke i samme omfang i den numeriske model som ved trykmålingerne. Det tyder på, at bestemmelsen af friktionstallet ikke er passende ved trykstød. Bergant, Simpson og Vítkovský har undersøgt benyttelsen af ikke-stationær friktions modeller ved beregning af trykstød i pumpeledninger [Bergant et al., 2000]. Ved simulering har de gengivet trykmålinger foretaget i laboratorium. Deres konklusion er, at benyttelse af en ikke-stationær friktions model giver et resultat i bedre overensstemmelse med trykmålingerne end ved benyttelse af en stationær friktionsmodel. Til videre undersøgelse vil implementering af en ikke-stationær friktions model være interessant.

Ligeledes kan analysemodellen og den numeriske model opsat i dette projekt videreudvikles, både mht. tilpasning af modellerne og sammenkoblingen med et SRO-anlæg på et pumpesystem, således at trykmålingerne kan fjernovervåges. En udbygning af beskrivelsen af luft i den numeriske model er ligeledes af interesse, hvilket f.eks. kan gøres ved at programmere en vindkedel eller en luftbeholder, hvor der medregnes inerti og friktion. Desuden ville det være interessant at integrere en opstart af en pumpe med påvirkning fra en softstarter i den numeriske model.

Med en model, hvor der er taget højde for forslagene, vil et pumpesystem løbende kunne diagnosticeres. Dette vil være af økonomisk interesse for forsyningsselskaber. En effektiviseret vedligeholdelse af pumpesystemer ved computerbaseret fjernovervågning kan være medvirkende til at sikre en stabil drift og forsyningssikkerhed. Et vedligeholdt pumpesystem vil være mere energioptimal og minimere forekomsten af driftsstop, idet dårligt fungerende pumper og trykledninger vil kunne opdages på et tidligere stadie.

#### Litteraturliste

- Aalborg Forsyning, K. A. (2009). Vision 2100 samt udviklingsplan frem til år 2025. Http://www.forsyning.dk/media/37594/vision\_2100\_2009.pdf. Set februar 2012.
- Aalborg Forsyning, Kloak A/S (2012). Basisoplysninger vedr. "teststationer". Mailkorrespondance med Ole Nicolajsen.
- Andersen, H., Moritzen, J. og Gudbjerg, E. (2006). Coating af pumper. ISBN 87-991436-1-5, 1. udgave. Lokalenergi Handel A/S.
- Ayyub, B. M. og McCuen, R. H. (2003). Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists. Chapman & Hall/CRC.
- Bergant, A., Simpson, A. R. og Vítkovský, J. (2000). Developments in unsteady pipe flow friction modelling. Vol. 39, 2001, no. 3. Journal of Hydraulic Research.
- Borg, C. (2008). Strategi for pumpedrift med henblik på energibesparelse. Afgangsprojekt, Aalborg Universitet.
- Brorsen, M. og Larsen, T. (2007). Lærebog i hydraulik. ISBN 978-87-7307-691-0, 1. udgave, 3. oplag. Aalborg Universitetsforlag.
- Burrows, R. og Qiu, D. Q. (1995). Effect of air pockets on pipeline surge pressure. 112, Dec., 349-361. Proc. Instn. Civ. Engrs. Wat., Marit. & Energy.
- Dansk Byggeri (2007). Erhvervspolitisk grundlag. ISBN 87-92008-01-1. Dansk Byggeri.
- DANVA (2012). Afløbsledninger. Http://www.danva.dk/Default.aspx?ID=486&TokenExist=no. Set februar 2012.
- DMI (2010). Ændringer i Danmark. Http://www.dmi.dk/dmi/index/klima/fremtidens\_klima-2/aendringer\_i\_danmark.htm. Set februar 2012.
- Elsparefonden og DANVA (2012). Bestykningen og råvandsledningen. Http://www.energibesparelser-vand.dk/Default.aspx?ID=1237&TokenExist=no. Set februar 2012.
- EnviDan A/S (2012a). Basisoplysninger vedr. pumpestationer tilhørende Vestforsyning Spildevand A/S. Mailkorrespondance med Mark Mathiesen.

- EnviDan A/S (2012b). Oversigtskort af trykledningensstrækningen fra pumpestation Egensevej og pumpestation Syrenvej. Oversigtskort udarbejdet af Aske Malvang Kristensen.
- EnviDan A/S (2012c). Trykledningensstrækningen fra pumpestation Egensevej 160. Data til MIKE URBAN.
- ESI (2012). GS4200-USB Pressure Transducer. Http://www.ellisonsensors.com/gs4200-usb-pressure-transducer/. Set februar 2012.
- European Commission (2001). Study on improving the energy efficiency of pumps. Http://www.multitrode.com/userfiles/image/zone\_files/Acroba\_pdf/eu\_report\_save\_ pumps\_final\_report\_june\_2003.pdf. Set februar 2012.
- Grontmij (2012). Energioptimering af pumpestationer. Http://www.grontmij.dk/DK/Ydelser/Forsyning/Afloebsteknik/ Energirigtig-pumpeteknik/Documents/Energioptimering.pdf. Pjece set februar 2012.
- Grundfos (2012). Den overraskende sandhed om pumper. Http://energy.grundfos.com/da/ fakta-om-energi-og-pumper/den-overraskende-sandhed-om-pumper. Set februar 2012.
- Heilmann, T. (2009). Pumpedrift og energi. ISBN 978-87-90603-16-8, 5. udgave. Heilmanns Forlag.
- Hjertedoktor.dk (2012). Undersøgelsesmetoder : EKG. Http://hjertedoktor.dk/?ug=5&st=3. Set februar 2012.
- Kloakforsyningen (2008). Spildevandsplan Aalborg Kommune. Http: //www.forsyning.dk/forsyningsportal/AKK/SpvPlan2008/spildevandsplan\_godkendt.pdf. Set februar 2012.
- Larsen, T. (2000). Pumpe Ståbi. ISBN 87-571-2296-2, 3. udgave, 1. oplag. Ingeniøren bøger.
- Larsen, T. (2006). *Water hammer in pumped sewer mains*. Skrift udgivet af EVA Udvalget for Erfaringsudveksling i VAndmiljøteknikken.
- Larsen, T. (2012). Diagnosticering af helbredstilstanden af kloakpumpesystemer ud fra trykmålinger. DanskVAND - fra kildevand til spildevand, årgang 80, nr. 1. DANVA, Dansk Vand og Spildevandsforening.
- Larsen, T. og Burrows, R. (1992). Measurements and Computations of Transients in Pumped Sewer Plastic Mains. ISBN 978-0792-31668-8. Springer. The International Conference on Pipeline Systems.
- Lægehåndbogen (2009). EKG basis. Http://laegehaandbogen.dk/hjerte-kar/undersogelser/ekg-basis-6255.html. Set februar 2012.
- Moritzen, J. (2005). Energiomsætning i pumper. Teknisk nyt nr. 7, s. 26-27.

- Nordjyllands Amt (2005). Regionplan 2005. Http://www.naturstyrelsen.dk/Planlaegning/Landsplanlaegning/Regionplan2005/Nordjylland/. Set februar 2012.
- Petersen, J. V. (2008). Dæmpede svingninger (svagt dæmpet harmonisk oscillator).
  Http://art-science-soul.dk/files/maplefiles/damp\_oscillator\_short2.html. Set april
  2012.
- Reynolds, L. og Bunn, S. (2010). Improving energy efficiency of pumping systems through real-time scheduling systems. Http://www.derceto.com/about-us/Presentations-papers/pod-files/PresentationsAndPapers/340.pdf. Set februar 2012.
- Sundhedsguiden (2006). Hjertets og blodkarrenes opbygning.
  Http://www.sundhedsguiden.dk/da/temaer/alle-temaer/hjerte-kar-sygdomme/
  nyttig-viden/hjertets-og-blodkarrenes-opbygning-/. Set februar 2012.
- Vandsektorens Teknologiudviklingsfond (2012). EKG-system fra sundhedssektoren bruges til computerovervågning af pumpesystemer.
  Http://vtu-fonden.dk/projektzonen/projekter/2011/7229.aspx. Set februar 2012.
- Vestforsyning Spildevand A/S (2012). Oplysninger omkring pumpestationer. Mailkorrespondance med Jette Fleng Jensen.
- Winther, L., Linde, J. J., Jensen, H. T., Mathiasen, L. L. og Johansen, N. B. (2006). Afløbsteknik. ISBN 87-502-0975-2, 5. udgave, 1. oplag. Polyteknisk Forlag.
- Wylie, E. B. og Streeter, V. L. (1985). *Fluid Transients*. ISBN 0-9610144-0-7, 3. udgave. FEB Press.

## Modtryk i et pumpesystem

Det nødvendige tryk for at transportere vand afhænger af ledningskarakteristikken, idet trykket fra pumpen skal overvinde modtrykket i ledningssystemet. Modtrykket udgøres af tre bidrag:

- Geometrisk løftehøjde
- Enkelttab
- Rørtab

Den geometriske løftehøjde,  $H_{geo}$ , er afstanden målt fra den laveste vandstand i pumpesumpen til den højeste vandstand i oppumpningsstedet, hvilket ses på figur 3.1 på side 7. Ofte sættes den geometriske løftehøjde ud fra en gennemsnitlig vandstand i pumpesumpen.

Enkelttab forekommer ved tværsnitsændringer og retningsændringer i trykledningen, som f.eks. ved rørudvidelser, ventiler, rørbøjninger og sammenløb. Energitabet varierer med vandet hastighed, hvor enkelttabene bliver betydelige ved høje vandhastigheder. Enkelttabet beregnes af ligning A.1. [Larsen, 2000]

$$\Delta H_e = \zeta \cdot \frac{V^2}{2g} \tag{A.1}$$

hvor

Modstandstallet kan findes ved opslag i håndbøger eller ved at måle sammenhængende værdier af energitab og middelhastighed af en væske på begge sider af f.eks. en rørudvidelse.

Rørtab opstår ved ensformig strømning på retlinede ledninger og skyldes tilstedeværelsen af forskydningsspændinger i væsken. Rørtabet benævnes også friktionstabet. Tabet øges med kvadratet på volumenstrømmen og beregnes via ligning A.2. [Larsen, 2000]

$$\Delta H_f = I \cdot L \tag{A.2}$$

hvor

 $\begin{array}{c|c} \Delta H_f & \text{rørtab} & [m] \\ I & \text{energilinjens gradient} & [-] \\ L & \text{ledningslængde} & [m/s] \end{array}$ 

Energilinjegradienten er defineret som energitabet pr. længdeenhed og kan beregnes ved ligning A.3. [Larsen, 2000]

$$I = f \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot R} \tag{A.3}$$

hvor

 $\begin{array}{c|c} R & \mbox{hydraulisk radius [m]} \\ f & \mbox{friktiontal [-]} \end{array}$ 

Hydraulisk radius findes ved ligning A.4. [Larsen, 2000]

$$R = \frac{A}{P} \tag{A.4}$$

hvor

$$A$$
gennemstrømmende tværsnitsareal $[m^2]$  $P$ beskyllet omkreds $[m]$ 

Friktionstallet er en dimensionsløs faktor, som afhænger af trykledningens ruhed samt, om strømningen er laminær eller turbulent. For turbulent strømning kan friktionstallet beregnes ved Colebrook & Whites formel, se ligning A.5. [Larsen, 2000]

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = 6, 4 - 2, 45 \cdot \ln\left(\frac{k}{R} + \frac{4,7}{Re \cdot \sqrt{f}}\right) \tag{A.5}$$

hvor

k ækvivalent sandruhed [m] Re Reynolds tal [-]

Reynolds tal er en dimensionsløs parameter, der udtrykker forholdet mellem inertikræfter og laminære kræfter. Reynolds tal findes af ligning A.6. [Larsen, 2000]

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} \tag{A.6}$$

hvor

 $\nu$  | kinematisk viskositet  $\left[\mathrm{m}^2/\mathrm{s}\right]$ 

Laminær strømning er givet ved Re < 580 mens turbulent strømning findes ved Re > 750 [Brorsen og Larsen, 2007]. Ved strømning med et Reynolds tal mellem 580 og 760 kan strømningsformen enten være laminær eller turbulent.

Trykledningens specifikke modtryk, K, findes ved at summere den geometriske løftehøjde, enkelttabene og rørtabet i pumpesystemet. Det samlede tryktab i ledningssystemet,  $\Delta H_{tab}$ , bestemmes af A.7. [Brorsen og Larsen, 2007]

$$\Delta H_{tab} = K \cdot Q^2 \tag{A.7}$$

hvor

Q volumenstrøm  $[m^3/s]$ 

Det samlede modtryks variation med volumenstrømmen benævnes ledningskarakteristikken og er givet ved en krum kurve. En grafisk afbildning af ledningskarakteristikken ses på figur A.1.



Figur A.1: Ledningskarakteristikken er summen af den geometriske løftehøjde, enkelttabene og rørtabet som funktion af volumenstrømmen.

## Længdeprofil Egensevej



Figur B.1: Længdeprofil af trykledningen fra pumpestation Egensevej. [EnviDan A/S, 2012c]

## Længdeprofil Borbjerg



Figur C.1: Længdeprofil af trykledningen fra pumpestation Borbjerg. [Vestforsyning Spildevand A/S, 2012]

# Bilagsfortegnelse

Bilagene findes på den vedlagte bilags-CD.

Bilag 1:	Datablade om pumpestation Egensevej
Bilag 2:	Datablade om pumpestation Syrenvej
Bilag 3:	Trykmåling foretaget den 6/3 2012 på pumpe station Egensevej
Bilag 4:	Trykmåling foretaget den 16/3 2012 på pumpe station Syrenvej
Bilag 5:	Trykmåling foretaget den 16/5 2012 på pumpe station Staby
Bilag 6:	Trykmåling foretaget den 16/5 2012 på pumpe station Tvis
Bilag 7:	Trykmåling foretaget den 16/5 2012 på pumpe station Mejdal
Bilag 8:	Trykmåling foretaget den 16/5 2012 på pumpe station Borbjerg
Bilag 9:	Analysemodel af pumpestation Egensevej
Bilag 10:	Analysemodel af pumpestation Syrenvej
Bilag 11:	Analysemodel af pumpestation Staby
Bilag 12:	Analysemodel af pumpestation Tvis
Bilag 13:	Analysemodel af pumpestation Mejdal
Bilag 14:	Analysemodel af pumpestation Borbjerg
Bilag 15:	Kalibrering af numerisk model - pumpestation Syrenvej
Bilag 16:	Kalibrering af numerisk model med luft - pumpestation Egensevej
Bilag 17:	Numerisk model - pumpestation Syrenvej
Bilag 18:	Numerisk model med luft - pumpestation Egensevej