

Driftsoptimering af pumpesystemer

Afgangsprojekt

Søren Holm Andersen

Vand og Miljø, Aalborg Universitet

2015



Driftsoptimering af pumpesystemer

 \mathbf{af}

Søren Holm Andersen

Afgangsprojekt ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet for delvis opfyldelse af kravene til titlen

Civilingeniør, cand.polyt., i Vand og Miljø

10. Juni 2015 Aalborg, Danmark

Nøgleord: kloakpumpeledninger, energioptimering, fjernovervågning, hydraulisk rensning, svovlbrintebekæmpelse, selvrensning

Dette afgangsprojekt er udarbejdet af Søren Holm Andersen, studerende ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Projektets indhold krediteres med 50 ECTS-point og er skrevet i perioden 1. september 2014 til 10. juni 2015. Projektet er udarbejdet med vejledning fra Torben Larsen, professor ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. For hans kyndige og inspirerende vejledning og evige lyst til at dele ud af sin erfaring udtrykker jeg min taknemmelighed.

En stor del af undersøgelserne i mit afgangsprojekt er lavet i samarbejde med erhvervslivet. Specielt vil jeg gerne takke.

- EnviDan A/S for at give adgang til de opstillede trykmålere i Tvis og Kongerslev. Specielt vil jeg takke Ole Neerup-Jensen og Mareike Arensman Hald for vejledning og samarbejde gennem projektforløbet samt muligheden for at holde oplæg på Pumpetræf 2015.
- Bjarne Vestby Jensen og Lars Velling Andersen fra Rebild Vand og Spildevand A/S for samarbejde, faglig sparing og muligheden for at lave forskellige undersøgelser på deres pumpeledning i Støvring.
- Carsten Sørensen fra Brønderslev Spildevand A/S for muligheden for at undersøge effekten af luftindblæsning i pumpeledningen i Gerå.
- Anne Kirstine Bjerring, Brian Frost og Søren Erikstrup fra Mariagerfjord Vand A/S for muligheden for at udføre fuldskalaforsøg med luftindblæsning.
- Henrik Koch fra Institut for Byggeri og Anlægs laboratorie for assistance, idéudvikling og vejledning i konstruktionen af målekassen.

Projektet er skrevet til en målgruppe af videnskabsfolk og ingeniører. Af hensyn til eventuelle læsere udenfor denne målgruppe summeres hvert kapitel i en række key points. Derudover er projektets indhold præsenteret i et kort resumé nedenfor. Projektet er trykt i tre eksemplarer og er desuden tilgængelig på Aalborg Universitets digitale projektdatabase.

> Søren Holm Andersen andersenholm@icloud.com

Abstract

This project deals with the challenge of optimizing the maintenance of pumped sewer systems. Recently, a method to monitor the health condition of a pump system based on pressure measurements has been developed. The method is inspired by electrocardiography, as the pressure measurements during transients are converted to knowledge about the condition of both the pump and the pipeline. Currently, the monitoring is used to reduce maintenance costs by enabling a demand-controlled maintenance program. In this project, the method is used to optimize the energy consumption of pump systems. An analysis of the current operation of two typical Danish pumped sewer mains in Kongerslev and Tvis, Denmark shows that it is possible to reduce the energy consumption by 60% in Tvis, if the flow velocity is reduced to $0.5 \,\mathrm{ms}^{-1}$. However, normal engineering practice is to avoid such low velocities as they are associated with a risk of insufficient self-cleaning. In the project, the possibility of reducing the flow velocity without increasing the roughness is investigated, when a hydraulic flushing of the pipeline is implemented. In such a pump operation, the pressure measurements serve as an indicator for the need for flushing. However, an analysis of the efficiency of a regular hydraulic flushing of a pipeline indicates that the typical pump sump is too small to facilitate an effective cleaning of the pipe. Therefore, hydraulic flushing can only be implemented in an energy optimization, if the current standards for pump system design are altered. Another widespread issue with the long pumped sewer systems is the formation of hydrogen sulfide. In this project, the effectiveness of adding pressurized air to the pipeline as a means for reducing hydrogen sulfide formation is investigated. The analysis concludes that air injection in certain pipelines is a cost-effective solution but cannot be considered a general means, as the air in some pipelines causes operational issues. In the last part of the project, commercial CFD-software is used to analyse and optimize the self-cleaning ability of two pump sumps. The use of CFD-software shows a potential to improve pump sump design. However, CFD-simulations will be particularly useful in the design of pump sumps if a new solution method is implemented. The method should enable the simulation of free surface flows without the current requirements to describe the air phase.

Resumé

Dette projekt omhandler driftsoptimering af kloakpumpeledninger, som i kraft af centraliseringen af spildevandsrensningen udgør et vigtigt element i nutidens afløbssystem. Indenfor de seneste år er der udviklet en metode til overvågning af pumpesystemers helbredstilstand baseret på trykmålinger. Metoden er insipreret af elektrokardiografi, idet trykmålingerne omsættes til viden om pumpens og kloakledningens tilstand. På nuværende tidspunkt anvendes metoden til at nedbringe vedligeholdelsesomkostningerne, da den danner grundlaget for en behovsstyret vedligeholdelsesstrategi. I dette projekt udvides metodens anvendelsesområde til energioptimering af pumpesystemer. En analyse af potentialet for energibesparelser i to kloakpumpeledninger i Kongerslev og Tvis viser således, at der specielt i ledningen i Tvis er et potentiale for energibesparelser på op mod 60%, hvis ledningshastigheden reduceres til $0.5 \,\mathrm{ms}^{-1}$. I projektet undersøges muligheden for at nedsætte ledningshastigheden uden en forøgelse af ledningens ruhed, hvis der samtidig implementeres en behovsstyret hydraulisk rensning, som baseres på overvågningen af pumpeledningens ruhed. En analyse af en regelmæssig hydraulisk rensning i en eksisterende pumpeledning viser imidlertid, at pumpesumpen typisk er for lille til at ledningen på effektiv vis kan skylles ren, og at energioptimeringen med hydraulisk rensning først kan blive implementeret ved nyanlæg, hvis den nuværende praksis for projektering af pumpesumpe ændres. I projektet undersøges desuden muligheden for at bekæmpe svovlbrintedannelse ved indblæsning af trykluft i kloakledninger. Analysen konkluderer, at luftindblæsning i nogle tilfælde er en omkostningseffektiv løsning, men at luftindblæsning ikke kan betragtes som et universelt virkemiddel, da luften på nogle ledningsstrækninger vil nedsætte kapaciteten af pumpesystemet markant. I projektets sidste del undersøges muligheden for at analysere og optimere pumpesumpes selvrensningsevne ved hjælp af kommercielle CFD-programmer. Det konkluderes, at CFD-simuleringer kan bidrage til optimering af pumpesumpes selvrensningsevne, og at simuleringerne specielt vil være anvendelige, hvis der implementeres en ny løsningsmetode, der muliggør simulering af varierende vandstand uden behov for at inddrage luftfasen i simuleringen.

Indholdsfortegnelse

1	Proj	ektbeskrivelse	1		
	1.1	Baggrund	1		
	1.2	Projektets mål	2		
	1.3	Fremgangsmåde	3		
2	Udgangspunkt for energioptimering				
	2.1	Ledningernes formål	5		
	2.2	Ledningsdata	6		
	2.3	Nuværende energiforbrug	7		
3	Overvågning af pumpestationer				
	3.1	Målerens funktion	9		
	3.2	Målerens opbygning	10		
	3.3	Afprøvning af trykmåler	12		
4	Diag	nosticering af pumpesystemets tilstand	15		
	4.1	Krav til diagnosticering	15		
	4.2	Fremgangsmåde	15		
	4.3	Direkte estimering	16		
	4.4	Invers estimering	23		
	4.5	Sammenligning af metoder	25		
5	Hydraulisk rensning af pumpeledninger 27				
	5.1	Formål med hydraulisk rensning	27		
	5.2	Skylleprogrammet i Støvring	27		
	5.3	Regnbetinget skylning i Tvis	31		
	5.4	Energioptimering med hydraulisk rensning	33		
6	Lufti	ndblæsning i kloakpumpeledninger	37		
	6.1	Formålet med luftindblæsning	37		
	6.2	Luftindblæsning i Gerå	40		
	6.3	Fuldskalaforsøg i Als	46		
	6.4	Nuværende erfaringer	49		
	6.5	Udvikling af metoden	50		
7	Optimering af pumpesumpes selvrensningsevne 53				
	7.1	Fremgangsmåde	53		
	7.2	Nuværende design	54		
	7.3	Analyse af nuværende selvrensningsevne	56		
	7.4	Optimering af selvrensningsevne	58		

8	Erfar 8.1 8.2 8.3	inger og fremtidsperspektiver Energioptimering	63 63 64 65	
Referencer				
\mathbf{A}	Indhold på bilags CD			
в	Beregning af specifikt energiforbrug			
\mathbf{C}	Direkte estimering af pumpesystemets tilstand			
D	Mod	ellering af luftlommers effekt på trykstød		

- E Optimering af pumpestationen på Ny Kærvej
- F Indblæsning af trykluft
- G Opsætning af simulering i STAR CCM+

Selvom pumpers indkøbspris ofte udgør en betydelig udgiftspost i anlægsfasen, vil den over tid blive overgået af omkostninger til drift og vedligeholdelse af pumpesystemet. Gennem dette projekt undersøges en række metoder til optimering af pumpesystemers drift. I dette kapitel introduceres baggrunden og målet for projektet, ligesom strukturen af projektrapporten skitseres.

1.1 Baggrund

I takt med centraliseringen af spildevandsrensningen i Danmark er lange pumpeledninger blevet et udbredt og vigtigt element i nutidens afløbssystem. Selvom centraliseringen samlet set har medført væsentlige driftsbesparelser på spildevandsrensning, er driftsomkostningerne til pumpning imidlertid steget. På figur 1.1 ses et eksempel på et typisk regnskab for en pumpes livstidscyklusomkostninger opgjort efter 7 års drift.



Figur 1.1. Eksempel på livstidscyklusomkostninger for et pumpesystem efter 7 år. [1]

Omkring 60 % af livstidsomkostningerne går til at forsyne pumpens motor med elektricitet, således pumperne kan transportere vandet mod oppumpningsbrønden. Indlejret i udfordringen med at transportere vandet er ofte, at kravet til afstrømningen fra pumpen langt fra er konstant. Derfor vælges pumper med en kapacitet svarende til ekstreme hændelser, hvorfor pumperne i langt de fleste pumpninger er større end nødvendigt. For at kompensere herfor indføres i stigende grad omdrejningsregulering af pumperne, som typisk regulerer pumperne til at yde deres maksimale virkningsgrad, for på den måde at minimere energitab i motor og pumpe. Selvom energibetragtninger i større grad er blevet en betydende faktor ved design af pumpesystemer viser erfaringer, at der ofte er potentiale for energibesparelser på mellem 30 og 50 % ved optimering af pumpedrift. Det estimeres desuden, at 20 % af verdens totale energiforbrug bruges til at drive pumper. Der er derfor potentiale for store økonomiske besparelser ved driftsoptimering af pumpeledninger, ligesom der er mulighed for en betydelig reduktion af CO₂-emmissioner på verdensplan. [2]

Pumperne kræver desuden løbende vedligeholdelse, hvilket udgør den næststørste post i livstidscyklusregnskabet. Traditionelt set har strategien for vedligeholdelse af pumpesystemerne været enten rutinemæssig eller behovsbaseret. Det forebyggende vedligehold sikrer en højere driftssikkerhed men samtidig også en unødig høj vedligeholdelsesomkostning, fordi udskiftningerne unægteligt fra tid til anden vil være unødvendige. Alternativt kan mindre fejl udvikle sig gennem tid og ødelægge pumpen, fordi behovet ofte først opdages ved defekter i pumpen. Ved en tidligere indgriben kunne reperationen muligvis begrænse sig til udskiftningen af en enkelt del i stedet for hele pumpen. Derfor styres valget af vedligeholdelsesstrategi hovedsageligt af de økonomiske konsekvenser ved et eventuelt driftstop og erfaringsmæssigt også af størrelsen på pumpen. Den rutinemæssige og forebyggende vedligeholdelsesstrategi praktiseres eksempelvis i Amsterdam, hvor der i gennemsnit registrerers cirka 4 årlige fejl per pumpe og en total årlig nedetid på 13,5 timer. Til sammenligning er vedligeholdelsen af pumperne i Rotterdam koncentreret omkring driftsstop og defekter, hvor der i gennemsnit registreres 13 årlige fejl per pumpe og en total nedetid på 10 timer. [3]

1.2 Projektets mål

Indenfor de seneste år er der udviklet en metode til diagnostisering af pumpestemers vedligeholdelsesbehov. Metoden er inspireret af hjertekardiografi, idet pumpens behov for vedligehold kan forudsiges ud fra trykmålinger ved pumpestart. Udviklingen af metoden er sket under et forskningsprojekt støttet af Vandsektorens Teknologiudviklingsfond (VTU). Projektet er afsluttet i 2014 og er udarbejdet i et samarbejde mellem EnviDan A/S, Aalborg Universitet, Aalborg Forsyning, Kloak A/S og Vestforsyning A/S. Ved implementering af denne metode er det principielt muligt at indføre en behovsstyret vedligeholdelse, der baserer sig på faktiske målinger af pumpernes slid. Metoden vil derfor kunne reducere vedligeholdelsesomkostninger i mange pumpestationer. I Amsterdam vil metoden kunne nedbringe den årlige nedetid, idet der ikke vil blive foretaget overflødig vedligehold. I Rotterdam kan metoden nedbringe antallet af pumpefejl, fordi behovet opdages før havari. Metoden kan med andre ord finde et optimum mellem de to traditionelle vedligeholdelsesmetoder praktiseret i Rotterdam og Amsterdam.

I dette projekt undersøges muligheden for at videreudvikle denne metode til også at styre driften af pumperne og dermed minimere pumpernes energiforbrug. Selvom den totale virkningsgrad mindskes vil det således ofte kunne betale sig at skrue ned for hastigheden i ledningsnettet, idet friktionen og dermed det specifikke energiforbrug per pumpet kubikmeter vand reduceres betydeligt. Den nedre grænse for ledningshastigheden udgøres normalt af selvrensningskrav, og for at undgå problemer hermed har det hidtil været praksis at holde en forholdsvist høj ledningshastighed i alle pumpninger. I teorien er det imidlertid muligt at holde en generel lav ledningshastighed i hovedparten af tiden, hvis ledningen renskylles i enkelte pumpninger, hvor systemets fulde kapacitet udnyttes. I projektet undersøges derfor effekten af regelmæssig hydraulisk rensning i en pumpeledning, der under normal drift ikke overholder de gængse selvrensningskrav. Den hydrauliske rensning kan styres af trykmålinger, idet disse kan omsættes til dynamisk viden om ledningens ruhed og dermed behovet for renskylning. En succesfuld implementering af denne driftsstrategi vil medføre en betydelig reduktion af energiforbruget til pumpning. De lange pumpeledninger kombineret med øget separering og kloaksanering giver i mange tilfælde anledning til svovlbrintedannelse, som er et problem i forhold til lugtgener, sundhedsrisiko og korrosion af beton. I projektet undersøges muligheden for at reducere svovlbrintedannelse ved hjælp af luftindblæsning i pumpeledninger. Luftindblæsningen kan således betragtes som et alternativ til de traditionelle metoder til svovlbrintebekæmpelse, hvor der typisk doseres kemikalier i pumpesumpen.

En af de største kilder til driftsproblemer i pumpesystemer er uhensigtsmæssig udformning af pumpesystemets sugeside, herunder sugeledninger og pumpesump. Ofte opdages kun symptomerne på dårlig udformning af sugesiden, som følgeligt fortolkes som problemer med pumper eller ledning. Vedligeholdelsen fokuseres derfor ofte på tryksiden, selvom årsagen til problemerne i virkeligheden er systemets sugeside. I dette projekt undersøges derfor også muligheden for at reducere driftsomkostninger gennem hensigtsmæssig og gennemtænkt design af pumpesumpen baseret på computersimuleringer.

1.3 Fremgangsmåde

Projektrapporten er inddelt i kapitler, der hver især bidrager til at nå projektets mål om at undersøge potentialet for driftsbesparelser i pumpesystemer.

- I projektrapportens kapitel 2 undersøges den nuværende driftsstrategi af to typiske eksempler på pumpesystemer til transport af spildevand over længere afstande i Danmark. Denne undersøgelse etablerer udgangspunktet for energioptimeringen.
- I kapitel 3 beskrives konstruktionen af en målestation til fjernovervågning af pumpestationers tryk. En pålidelig og dynamisk adgang til trykmålinger er således en grundlæggende forudsætning for at basere pumpedrift på trykmålinger.
- I kapitel 4 omsættes trykmålingerne til viden om pumpesystemets tilstand ved hjælp af teorien for trykstød i pumpeledninger. Specielt omsættes trykmålingerne til viden om pumpens slid, ledningens ruhed og lokalisering af eventuelle luftlommer på ledningen.
- I kapitel 5 undersøges effekten af hydraulisk rensning på en ledning, hvor der på grund af fejldimensionerede pumper er problemer med selvrensning. Undersøgelsen kan afsløre vigtige erfaringer om muligheden for at holde en ledning ren ved kun at overholde selvrensningskravet i enkelte pumpninger dagligt og dermed muligheden for at energioptimere pumpeledningerne gennem reduktion af pumpeydelsen.
- I kapitel 6 undersøges muligheden for at bekæmpe svovlbrintedannelse i en pumpeledning ved at indblæse atmosfærisk luft i ledningen efter endt pumpning. Kapitlet baseres på målinger i en pumpestation, hvor svolvbrinteproblemer er fjernet ved luftindblæsning og erfaringerne herfra anvendes i et fuldskalaforsøg.
- I kapitel 7 flyttes fokus fra tryksiden til sugesiden, idet muligheden for at optimere designet af pumpesumpe gennem anvendelse af computersimuleringer i et kommercielt CFD-program undersøges. Der fokuseres på analyse og optimering af to pumpesumpes selvrensningsevne.
- I kapitel 8 opsummeres undersøgelserne i de enkelte kapitler. Konklusionerne fra projektet suppleres med en række fremtidsperspektiver.

Key Points

Præsentationen af projektets baggrund og mål kan summeres i følgende key points.

- Lange pumpeledninger er blevet et udbredt element i det moderne afløbssystem i Danmark.
- Det estimeres, at pumpning udgør $20\,\%$ af verdens totale energiforbrug.
- Selvom livstidsomkostninger i stigende grad er blevet en betydende faktor ved design af pumpesystemer er der i mange tilfælde potentiale for energibesparelser på mellem 30 og 50 %.
- Indenfor de seneste år er der udviklet en metode til diagnosticering af pumpers vedligeholdelsesbehov ved måling af trykniveau ved pumpestart og -stop.
- I dette projekt undersøges muligheden for at optimere pumpedriften ved hjælp af trykmålingerne og dermed reducere pumpernes energiforbrug.
- Med en dynamisk overvågning af ledningen bør det være muligt at øge ledningshastigheden i enkelte pumpninger for på den måde at skylle ledningen ren, hvis trykmålingerne viser en begyndende tilstopning eller ophobning af luft på ledningen.
- I den resterende tid kan ledningshastigheden reduceres, hvorved energiforbruget reduceres betydeligt. En succesfuld implementering af denne driftsstrategi vil med andre ord betyde store energibesparelser.
- I lange pumpeledninger er der ofte problemer med svovlbrintedannelse som følge af lange opholdstider. I projektet undersøges muligheden for at fjerne svolvbrintedannelse ved indblæsning af atmosfærisk luft i pumpeledninger.
- Sugesiden i pumpesystemer er en hyppig årsag til driftsproblemer, men i mange tilfælde opdages kun symptomerne heraf, hvorfor vedligeholdelsen fokuseres på tryksiden. I projektet undersøges muligheden for at anvende computersimuleringer til analyse og optimering af pumpesumpes selvrensningsevne.

Muligheden for at energioptimere pumpeledninger afhænger i høj grad af pumpesystemets udformning. I dette kapitel undersøges potentialet for energioptimering af to pumpeledninger i henholdsvis Kongerslev, Nordjylland og Tvis, Vestjylland. Pumpestationerne udgør typiske eksempler på længere pumpeledninger i Danmark og er udvalgt, fordi der gennem VTU-projektet er etableret en fjernovervågning af trykket i pumpeledningerne.

2.1 Ledningernes formål

De to pumpesystemer er placeret i henholdsvis Kongerslev cirka 25 km sydøst for Aalborg og i Tvis syd for Holstebro. Pumpeledningen i Kongerslev er ejet af Aalborg Forsyning, Kloak A/S mens ledningen i Tvis er ejet af Vestforsyning Spildevand A/S. Begge pumpeledninger er opført som en del af en centralisering af spildevandsrensningen i de respektive forsyningsområder. Pumpeledningen i Kongerslev er en del af et længere netværk af pumpeledninger, der transporterer spildevand til Renseanlæg Øst i den østlige del af Aalborg. Pumpestationen på Syrenvej i Kongerslev blev redesignet som en del af separeringen af byens fælleskloakerede oplandsareal i 2009. Pumpestationen modtager spildevand fra et oplandsareal på cirka 132 ha, hvoraf omtrent 30% er befæstet. Spildevandsbelastningen i området er skønnet til 2100 PE. [4] Der har efter opførslen været foretaget et omfattende arbejde for at lokalisere fejlkoblinger i oplandsarealet, som følgeligt i dag er reduceret til et minimum. [5] Pumpestationen vest for Tvis er sandsynligvis opført i forbindelse med udbygningen af hoveddelen af kloaknettet i Tvis i 60'erne og pumper en blanding af regn- og spildevand fra det delvist separerede opland til rensning på Holstebro Renseanlæg. Ledningen transporterer vand fra et oplandsareal på cirka 95 ha med en estimeret belastning på 2587 PE. En række ledninger pumper regn- og spildevand på ledningen nedstrøms for pumpestationen i Tvis. Linjeføringen for de to pumpeledninger er illustreret på figur 2.1.



Figur 2.1. Geografisk placering af pumpestation og linjeføring for pumpeledningen i Kongerslev (tv) og Tvis (th). [6] og [7]

2.2 Ledningsdata

Trykledningen i Tvis har en længde på 4325 m og er udført i 200 mm PVC-rør af ukendt trykklasse. Ledningens længdeprofil er ukendt, men den geometriske løftehøjde er under normal drift cirka 7 cm. Trykledningen i Kongerslev har en længde på 1944 m og er konstrueret af 200 mm PE PN10-rør. Ledningen har et længdeprofil som illustreret på figur 2.2 og under normal drift er den geometriske løftehøjde 20,4 m.



Figur 2.2. Længdeprofil for pumpeledningen i Kongerslev [8]

Selvom de to ledninger har samme rørdimensioner er de funktionelt forskellige, fordi pumpeledningen i Tvis hovedsageligt har til formål at øge kapaciteten af ledningen, mens en stor del af pumpens funktion i Kongerslev er at overvinde den geometriske løftehøjde. Variationen i kravet til afstrømningen er også en væsentlig forskel på de to ledninger, idet pumpeledningen i Tvis skal transportere regnvand fra den fælleskloakerede andel af oplandet. I Tvis er der installeret to dykpumper af forskellig producent, henholdsvis en Flygt 3153 og en ABS AFP-25-HD. Flygt-pumpen optager en akseleffekt på 11 kW og er dimensioneret til at have en startrampe på 10 sekunder og en stoprampe på 25 sekunder. Denne startrampe er forkortet væsentligt ved installationen af overvågning af trykket under pumpestart og -stop. ABSpumpen optager en akseleffekt på 21,3 kW og er installeret med softstarter og startes i praksis kun under regn. [9] På figur 2.3 ses pumpe- og ledningskarakteristikken for pumpesystemet i Tvis. Pumpekarakteristikken for ABS-pumpen er ukendt.

I Kongerslev er der installeret to ens tørtopstillede Hidrostal DE3U-SHN pumper, som under normal drift alternerer. Pumperne er oprindeligt programmeret med en stoprampe på 30 sekunder for at forhindre kritiske trykniveauer ved pumpestop, men også her er stoprampen forkortet betydeligt ved implementeringen af overvågningen af ledningen. Begge pumper i Kongerslev omdrejningsreguleres, således asynkronmotoren påføres en frekvens på 42 Hz fra frekvensomformeren. [8] På figur 2.3 ses pumpe- og ledningskarakteristikken for pumpesystemet i Kongerslev. Den angivne ledningskarakteristik svarer til en effektiv ruhed inklusiv enkelttab på 0,4 mm.



Figur 2.3. Lednings- og pumpekarakteristik ledningen i Kongerslev (tv) og Tvis (th). [8]

2.3 Nuværende energiforbrug

I det følgende foretages en beregning af pumpernes specifikke energiforbrug i.e. energiforbrug per pumpet kubikmeter spildevand. Beregningen foretages for forskellige ledningshastigheder, for at undersøge potentialet for energibesparelse ved en reducering af ledningshastigheden, og sker under anvendelse af affinitetsligningerne. Den anvendte beregningsmodel er beskrevet i detaljer i bilag B. På figur 2.4 ses resultatet af beregningen i henholdsvis Kongerslev og Tvis. I Kongerslev er vandføringen gennem pumpen ved normal drift $20 \, \text{ls}^{-1}$ svarende til en ledningshastighed på $0.8 \, \text{ms}^{-1}$. Ifølge beregningen giver det til et specifikt energiforbrug på $0.106 \, \text{kWh m}^{-3}$. Ved at mindske ledningshastigheden til $0.5 \, \text{ms}^{-1}$ er det ifølge beregningen muligt at reducere energiforbruget til $0.098 \, \text{kWh m}^{-3}$ svarende til en energibesparelse på 7 %. Denne ledningshastighed kan opnås ved at frekvensregulere pumpen til 34 Hz. Pumpestationen i Kongerslev estimeres at pumpe $315\,000 \, \text{m}^3$ spildevand årligt, hvilket betyder, at det ifølge beregningen er muligt at reducere pumpestationens energiforbrug med cirka 2500 kWh årligt. [8]



Figur 2.4. Specifikt energiforbrug ved varierende ledningshastighed i Kongerslev (tv) og Tvis (th). Optimum er markeret med en rød prik.

I beregningen er der ikke taget hensyn til energitab i frekvensomformeren, som erfaringsmæssigt har en virkningsgrad på 90 til 95 %. I Kongerslev frekvensreguleres pumperne allerede, så her vil omformerens virkningsgrad bevirke en øget besparelse i forhold til det beregnede på cirka 5 til 10 %. I Tvis er vandføringen gennem Flygt-pumpen ved normal drift også $20 \, \text{ls}^{-1}$ svarende til en ledningshastighed på $0.8 \, \text{ms}^{-1}$. Ifølge beregningen giver det til et specifikt energiforbrug

på 0,122 kWh m⁻³. I modsætning til ledningen i Kongerslev er der i Tvis ikke en nævneværdig geometrisk løftehøjde, hvilket betyder, at det specifikke energiforbrug er monotont aftagende ved reducering af ledningshastigheden. Ved eksempelvis at nedsætte ledningshastigheden til $0.5 \,\mathrm{ms}^{-1}$ vil det være muligt at reducere det specifikke energiforbrug til $0.046 \,\mathrm{kWh} \,\mathrm{m}^{-3}$, hvilket svarer til en reduktion af energiforbruget på 62 %. Forudsættes samme spildevandsmængde per PE som i Kongerslev estimeres pumpestationen i Tvis at pumpe cirka $388\,000\,\mathrm{m}^3$ spildevand årligt, og reduktionen af hastighed giver en potentiel besparelse på 29500 kWh per år. I denne beregning er der ikke medtaget bidrag fra regnvandsafstrømning fra det fælleskloakerede opland. idet det ikke er muligt at bibeholde en ledningshastighed på $0.5 \,\mathrm{ms}^{-1}$ under regn uden risiko for kapacitetsproblemer opstrøms for pumpen. Beregningen forudsætter desuden, at ruheden er uafhængig af ledningshastigheden. Erfaringsmæssigt er dette ikke tilfældet, idet en reduceret ledningshastighed vil give anledning til en øget belægning af biofilm og sedimentaflejring i ledningen. I den resterende del af projektet undersøges muligheden for at udforme en driftsstrategi, der gør det muligt at sænke ledningshastigheden under normal drift uden ruheden stiger, hvis der samtidig udføres en behovsstyret hydraulisk rensning af ledningen baseret på den målte ruhed i overvågningen af pumpestationen. Ud fra de ovenstående beregninger vil det primært kunne betale sig at implementere en sådan strategi i Tvis, hvor potentialet for besparelser muliggør en realistisk tilbagebetalingstid på opsætningen af systemet. I Kongerslev vil det være mere rentabelt at udvikle et system, der overvåger pumpens tilstand, ledningens ruhed og eventuelle luftansamlinger på ledningen, for på den måde at forhindre, at driften bevæger sig langt væk fra optimum.

Key Points

Udgangspunktet for energioptimeringen af de to pumpeledninger i henholdsvis Tvis og Kongerslev kan summeres i følgende punkter.

- De to pumpesystemer adskiller sig ved at pumperne i Kongerslev skal overvinde en betydelig højdeforskel mellem pumpesump og oppumpningsbrønd, mens højdeforskellen i Tvis er ubetydelig.
- Beregninger indikerer, at der er minimalt potentiale for energibesparelse ved at reducere ledningshastigheden i Kongerslev, fordi højdeforskellen mellem pumpesump og oppumpningsbrønd udgør den væsentligste del af modtrykket i ledningen.
- I Tvis er der derimod potentiale for besparelser på op mod 60% af energiforbruget til normal drift ved en reduktion af ledningshastigheden fra 0,8 til 0,5 ms⁻¹.
- For at forhindre, at ruheden i ledningen stiger ved reduktionen af ledningshastigheden er det nødvendigt at implementere en behovsstyret hydraulisk rensning af ledningen, som styres af målingen af ledningens ruhed.
- I Kongerslev kan det ikke betale sig at reducere ledningshastigheden med den nuværende pumpebestykning, men her er der mulighed for at overvåge pumpens tiltand, ledningens ruhed og luftindhold for at sikre, at driften ikke bevæger sig væk fra det optimale driftspunkt.

Tilgængeligheden af trykniveaumålinger med en høj tidslig opløsning er en grundlæggende forudsætning for diagnosticeringen af pumpesystemets tilstand. I dette kapitel konstrueres et måleapparat til opsamling af trykmålinger i en pumpestation. Måleapparatet er koblet på mobilnetværket, så målingerne kan tilgås ved fjernadgang.

3.1 Målerens funktion

Som en del af udviklingen af metoden til diagnosticering af pumpers vedligeholdelsesbehov i VTU-projektet er der konstrueret en målekasse, som overvåger trykniveauet i et pumpesystem. Målekassen registrerer desuden pumpernes strømforbrug og spildevandets temperatur. Målingen af strømforbruget muliggør udover registrering af faldende effektivitet også en adskillelse af pumpestationernes pumper ved vurdering af deres slid. Målekassen er produceret af El:Con A/S og forhandles af EnviDan A/S. [10] På figur 3.1 ses den færdige målekasse installeret i pumpestationerne på Syrenvej i Kongerslev.



Figur 3.1. Målekassen udviklet af Envi
Dan A/S og Aalborg Universitet under VTU-projektet.

Trykmålingerne foretages af en digital ESI GS4200-USB trykstransducer, som forhøjer materialeomkostningerne til målekassen betydeligt. [11] Derudover har der i den indledende periode været problemer med manglende tilgængelighed ved fjernadgang til måleren, sandsynligvis fordi dens Windows-baserede computer fryser. En analog trykstransducer vil reducere materialeomkostningerne til målekassen markant, ligesom en forøgelse af dataloggerens driftssikkerhed er nødvendig, hvis målingerne i fremtiden skal kunne anvendes til at styre pumpernes drift. Derfor konstrueres en prototype på en målekasse, som skal muliggøre udvikling af metoden til overvågningen af pumpesystemers tilstand.

3.2 Målerens opbygning

På figur 3.2 er opbygningen af den konstruerede prototype illustreret. Hver dag registreres trykket i pumpeledningen ved hjælp af en analog trykstransducer med en opsamlingsfrekvens på 20 Hz. Det analoge signal omformes til et digitalt signal i dataopsamlingskortet, som opsamles i den bærbare PC, der filtrerer målingerne til en frekvens på 5 Hz. Computeren er koblet på 3G-netværket ved hjælp af en simpel USB-router, således måledata kan tilgås ved fjernadgang. Computeren forsyner dataopsamlingskort og 3G-routeren med strøm, mens den analoge trykstransducer har en separat 12 VDC-strømforsyning. Den eksisterende datalogger er konstrueret med anvendelse af en fitPC, som er en kompakt og driftssikker Windowsbaseret PC. I prototypen anvendes i stedet en ASUS 11,6 tommer Windows-baseret netbook. Anvendelse af en netbook fremfor en fitPC giver den væsentlige fordel, at computeren kan tilgås i pumpestationen uden medbringelse af skærm, tastatur og mus. Derudover er netbooken mindre sårbar overfor kortvarige strømafbrydelser, fordi den har installeret et batteri. For at øge driftsikkerheden yderligere kan der med fordel anvendes en computer med et bundkort, der understøtter Real Time Clock-alarmer, således der kan programmeres en automatisk genstart, hvis computeren slukker.



Figur 3.2. Skematisk opbygning af dataloggeren til måling af trykniveau i pumpestationer. Stiblede pile indikerer strømforsyning mens fuldtoptrukne linjer repræsenterer strømme af data.

I VTU-projektet blev muligheden for at anvende en analog UNIK 5000-trykstransducer fra GE Measurement & Control Solution forkastet, fordi den var for støjfølsom til at måle i pumpestationer, hvor der normalt er et højt støjniveau. Støj kan imidlertid ofte reduceres betydeligt ved omhyggelig skærmning og grounding. Derudover kan en optimal anvendelse af måleopsamlingskortets 12-bit forbedre muligheden for at frafiltrere støj, hvis samplingfrekvensen samtidig er tilstrækkelig høj. Endeligt er det vigtigt at minimere ledningslængden fra trykstransduceren til dataopsamlingskort. Det anvendte dataopsamlingskort er et USB-1208LS fra Measurement Computing, som kan opsamle analoge signaler i single-ended og differential mode. [12] Trykstransducerne i serien UNIK 5000 fås i flere forskellige opsætninger, hvor den anvendte er af typen PMP-5074-TB-A1-CA-H1-PA. Denne type trykstransducer skal tilføres en strømforsyning på mellem 7 og 16 VDC. Trykstransducerens output er et trykafhængigt spændingsfald over to kanaler mellem 0 og 5 VDC, som kan relateres lineært til det målte tryk, idet 0 VDC svarer til et tryk på 0 barg, mens 5 VDC svarer til 10 barg. [13]

Egentligt kan outputtet fra trykstransduceren opsamles i single-ended mode, men her har dataopsamlingskortet kun mulighed for at anvende 11-bit og måleområdet er låst til ± 10 VDC. Det giver en opløsning på 20 cmVs, hvilket er en relativt dårlig udnyttelse af dataopsamlingskortet. Ved at lave opsamlingen i differential mode er det muligt at anvende 12-bit og justere måleintervallet til ± 5 VDC, hvilket giver en opløsning på 5 cmVs. Opsætningen i differential mode vil dermed gøre målingerne mindre sårbare overfor støj, fordi støj på målingerne ofte viser sig som spring mellem enkelte bit-værdier. En anden udfordring ved etableringen af fjernovervågning af pumpestationer er konstruktionen af en pålidelig netforbindelse. Dataloggeren skal således kunne tilgås ved fjernadgang, selvom den er placeret i en pumpestation med armerede betondæk. I sådanne tilfælde kan 3G-routeren kobles i en skærmet USB-forlængerledning med indbygget forstærker, således routeren kan placeres udendørs i en vandtæt plasticindpakning. For at forhindre kondensdannelse i indpakningen bør der placeres en modstand i indpakningen, idet den vil afgive varme i indpakningen og dermed forhindre kondensdannelse. Den færdige trykmåler er samlet i en el-kasse med transparent forside som vist på figur 3.3.



Figur 3.3. Den færdige trykmåler placeret i en el-kasse med transparent forside.

3.3 Afprøvning af trykmåler

Inden målekassen tages i brug i pumpestationer er det vigtigt at kalibrere trykstransduceren. Dette sker ved hjælp af en Budenberg Air dead-weight tester som er vist på figur 3.4. Apparatet er koblet til en trykflaske med nitrogen, der har et tryk på 10 barg.



Figur 3.4. Laboratorieopstilling til kalibrering af tryktransducer i en Budenberg Air deadweight tester (tv) og sammenhæng mellem spændingsfald i trykstransducerens output og målt tryk (th).

Håndtaget til højre åbner for en ventil på indløbet fra trykflasken, således der kan opbygges et overtryk i apparatet. I venstre side af apparatet er det muligt at påføre apparatet en veldefineret belastning og ved hjælp af de to resterende håndtag kan trykket i apparatet justeres, således det netop modsvarer belastningen fra lodderne, som dermed udgør en kendt reference for det målte tryk i trykstransduceren. På den måde er det muligt at lave en kalibreringskurve over sammenhængen mellem målt tryk og spændingen i trykstransducerens output. På figur 3.4 ses kalibreringskurven for den analoge trykstransducer, som stemmer ovens med angivelsen på trykmålerens datablad.

Målekassen opstilles som en del af undersøgelserne præsenteret i kapitel 6 i en pumpestation i Gerå, Nordjylland. Målekassen er opsat den 16. marts 2015 og fjernet igen den 8. april 2015. Forinden har målekassen logget atmosfæretrykket i en periode på 3 uger uden driftsforstyrrelser. Ved opsætningen den 16. marts 2015 blev den digitale ESI GS4200-USB-trykstransducer også monteret i pumpestationen for på den måde at muliggøre en vurdering af den analoge trykstransducers støjfølsomhed. På figur 3.5 ses de to transduceres målinger, hvor det skal bemærkes, at den digitale og analoge trykstransducer måler henholdsvist absolut og relativt tryk, og at målingerne er ikke foretaget simultant. Det ses, at der ikke er nævneværdig forskel på støjniveauet på de to målinger, hvorfor den digitale trykstransducer ikke anvendes i overvågningen.



Figur 3.5. Trykmålinger i pumpestationen i Gerå med digital GS4200-USB-trykstransducer (tv) og analog UNIK5000-transducer (th).

Forbindelsen til 3G-netværket i pumpestationen i Gerå har vist sig at være problematisk, fordi der i området generelt er dårlig mobildækning. Routeren er placeret ved pumpestationens ventilationsrist ved hjælp af en USB-forlængerledning med forstærker. Pumpestationens SROsystem er også koblet på det mobile 3G-netværk og her raporterer spildevandsoperatørerne fra Brønderslev Spildevand A/S om problemer med fjernadgang til pumpestationen. Pumpestationens SRO-system har installeret en ekstern 3G-antenne, som er placeret på pumpestationens tag. Det forventes derfor ikke at kunne forbedre netforbindelsen i Gerå at etablere en ekstern antenne. Forbindelsen er ikke stærk nok til at data kan downloades fra pumpestationen, men netforbindelsen tjener som en indikator af om computeren i målekassen kører efter hensigten.

Key Points

Konstruktionen af en målekasse til fjernovervågning af trykket i en pumpestation kan summeres i følgende key points.

- En pålidelig fjernadgang til trykmålinger fra pumpestationen er en grundlæggende forudsætning for at kunne overvåge pumpestationens tilstand.
- Igennem et udviklingsprojekt støttet af Vandsektorens Teknologiudviklingsfond, VTU, har EnviDan A/S og Aalborg Universitet udviklet en målekasse, der muliggør fjernovervågning af trykket i en pumpestation. Målekassen overholder gældende standarder og kan desuden overvåge strømforbrug, vandføring og temperatur i pumpestationen.
- For at muliggøre udvikling af metoden til diagnosticering af pumpesystemers tilstand ved hjælp af trykmålinger er der udviklet en lavpris-målekasse, som har til formål at registrere trykket i en pumpeledning i en kortere periode.
- Målekassen er afprøvet i en pumpestation i Gerå, Nordjylland gennem 3 uger. Målekassen har været i stand til at registrere trykket uden nedeperioder ved hjælp af en billig analog trykmåler, men der har været problemer med fjernadgang til måleren, fordi den er blevet opstillet i et område med dårligt mobilnet.
- Målekassen kan på kort tid monteres i langt de fleste pumpestationer, idet trykstransducerne kan kobles på de studser, som de analoge manometre sidder i. I Gerå blev målekassen således monteret på 15 minutter.

4. Diagnosticering af pumpesystemets tilstand

Ved hjælp af trykmålinger er det muligt at foretage en dynamisk overvågning af pumpesystemer, men uden efterbehandling har målingerne imidlertid ikke den store værdi. Derfor undersøges i dette kapitel forskellige metoder til konvertering af trykniveaumålinger til konkret viden om systemets tilstand.

4.1 Krav til diagnosticering

Formålet med at måle tryk i pumpesystemer er at opsamle et dynamisk fingeraftryk af systemets tilstand. Optimalt set skal diagnosticeringen leve op til følgende krav.

- Udviklingen af systemets driftspunkt, herunder ledningens ruhed og pumpeslid, skal overvåges dynamisk.
- Luftlommers placering og volumen skal bestemmes dynamisk.
- Lækage og utætte ventiler på ledningen skal kunne opdages.
- Diagnosticeringen skal foregå automatisk uden krav om regelmæssig kontrol i pumpestationen.
- Resultaterne skal være tilgængelige online og kræve minimal fortolkning.
- Diagnosticeringen skal være driftsikker og med minimal risiko for fejlfortolkninger af målinger, så det er muligt at indrette driftsstrategien herefter.
- Overvågningen skal være let at implementere og justere, så den passer til nye systemer.

Gennem den resterende del af dette kapitel undersøges muligheden for at udvikle et diagnosticeringssystem, der kan leve op til disse krav. Diagnosticeringen kan betragtes som en videreudvikling af arbejdet med at diagnosticere pumpers vedligeholdelsesbehov præsenteret i [9]. Afgangsprojektet fungerede som en forundersøgelse til VTU-projektet, hvor en metode til dynamisk overvågning af pumpesystemets driftspunkt er udviklet. I dette kapitel undersøges muligheden for at trække mere viden om pumpesystemt ud af trykmålingerne. Først beskrives to mulige fremgangsmåder, som efterfølgende afprøves i praksis, for endeligt at blive sammenlignet.

4.2 Fremgangsmåde

I mange naturlige systemer kan man ud fra målinger af vandstanden udtale sig om vandføringen. Et eksempel herpå er vandløb, hvor en Qh-relation omsætter en vandstandsmåling til en vandføring. Et lignende princip kan anvendes til bestemmelse af pumpens slid og ledningens ruhed ved hjælp af trykmålinger i.e. uden behov for vandføringsmålinger. Grundlæggende set findes der to måder at decifrere trykmålingerne og opnå viden om systemets tilstand, som i dette projekt benævnes.

- 1. Direkte estimering
- 2. Invers estimering

Metoderne har til fælles, at de begge tager højde for støj på målingerne, men adskiller sig på måden hvorpå de løser denne opgave. I den førstnævnte metode bestemmes det statiske trykniveau, det maksimale trykniveau ved pumpestart og driftstrykket ved stationær drift af pumpen. Disse trykniveauer bestemmes ved mønstergenkendelse af trykmålingerne ved at opsætte en række robuste kriterier, der tager højde for støj på måleserien. Trykniveauet i disse karakteristiske punkter anvendes til at udregne ledningens ruhed og pumpens slid. Metoden er baseret på [14] og anvender således kun trykmålingerne omkring pumpestart. Metoden bør imidlertid kunne udvides til også at anvende trykmålingerne ved pumpestop til estimering af eksempelvis luftindhold.

Alternativet til denne metode er at opstille en teoretisk computermodel, der kan simulere trykniveauet i den overvågede ledning under trykstød. Ved at kalibrere denne model bør det principielt være muligt at bestemme ledningens tilstandsvariable inverst. Computermodellen skal tage højde for alle væsentlige fænomener i pumpesystemet, og en væsentlig udfordring ved denne metode er derfor, at der kræves en entydig løsning. Det betyder med andre ord, at objektivfunktionen kun må have ét optimum. Objektivfunktionen for kalibreringen skal desuden tage højde for en vis variation mellem simulering og måling grundet støj, hvilket stiller yderligere krav til kalibreringens optimum, idet et fladt optimum giver anledning til stor usikkerhed på estimatet.

4.3 Direkte estimering

Den overordnede udfordring i diagnosticeringen af pumpesystemers tilstand baseret på trykmålinger, i.e. uden vandføringsmålinger, er at adskille slid af pumpen og ændringer i ledningens ruhed. På figur 4.1 ses en illustration af pumpekarakteristikken for en ny og en slidt pumpe. På figuren er der desuden indtegnet to ledningskarakteristikker med forskellige ruheder. I analysen benyttes det, at det maksimale trykniveau lige efter pumpestart ikke afhænger af ledningsnettet. Ud fra det maksimale trykniveau, som er markeret med blå på figuren, er det derfor muligt at bestemme den slidte pumpes pumpekarakteristik under antagelse af, at slidet kan udtrykkes som et anden ordens turbulent tryktab. Hvorvidt denne forudsætning stemmer overens med virkeligheden er vanskeligt at vurdere, idet der sjældent findes målinger af slidte pumpers karakteristik.



Figur 4.1. Skitsering af lednings- og pumpekarakteristik for et gammelt og nyt pumpesystem. [14]

Når den slidte pumpes karakteristik er bestemt er det muligt at beregne ledningens ruhed ud fra målingen af trykniveauet ved den stationære tilstand lige før pumpen stopper, som er markeret med grønt på figuren. Trykforplantningshastigheden kan bestemmes ved at analysere svingningerne ved pumpestop, og afhænger i høj grad af indholdet af suspenderede luftbobler i vandfasen. Større luftlommer vil ofte give anledning til reflektion af trykbølgerne, hvilket resulterer i en bagvedliggende svingning i variationerne i trykniveau efter pumpestop. På den måde bør det være muligt at lokalisere luft i ledningen ved at analysere svingningerne i trykniveau efter pumpestop.

Den konkrete implemetering samt forudsætningerne bag denne metode er beskrevet i detaljer i bilag C. Det er vigtigt at være opmærksom på om nogle af forudsætningerne ikke er overholdt ved implementeringen af metoden i et pumpesystem, idet det kan give fejlagtige analyseresultater. I mange tilfælde er det muligt at reducere eventuelle stop- og startramper, hvis trykstødsberegninger viser, at det ikke resulterer i skader på ledningen. Den opstillede analysemodel er anvendt til at analysere trykmålinger fra Kongerslev og Tvis, hvor der er kontinuerlige målinger tilgængelige for en måleperiode fra april 2014 til januar 2015. På figur 4.2 ses analysemodellens evne til at genkende de karakteristiske punkter. I de følgende afsnit analyseres en række interessante situationer med den præsenterede metode. Situationerne er udvalgte for at undersøge metodens evne til at opdage forskellige driftsforhold.



Figur 4.2. Målt trykniveau i Kongerslev 6. maj 2014 (tv) og i Tvis 1. juli 2014 (th) med genkendelse af pumpestop og -start.

4.3.1 Utæt kontraventil

Den 15. juli 2014 er der på overvågningen af pumpeledningen i Tvis opdaget et faldende statisk trykniveau. Måleserien er illustreret på figur 4.3. Det faldende trykniveau skyldes sandsynligvis, at vandet løber baglæns gennem pumpen og tilbage i pumpesumpen på grund af en utæt eller tilstoppet kontraventil. På ledninger med en større geometrisk løftehøjde som eksempelvis i Kongerslev kan en utæt kontraventil give anledning til et unødigt energiforbrug, fordi returstrømmen skal passere pumpen flere gange. På den flade ledning i Tvis er en utæt kontraventil ikke specielt kritisk, og ved de efterfølgende pumpninger fyldes ledningen igen og tilstopningen fjernes, men eksemplet illustrerer muligheden for at lokalisere utætte kontraventiler.



Figur 4.3. Faldende statisk trykniveau i ved pumpestationen i Tvis den 15. juli 2014.

4.3.2 Ændret startrampe i Kongerslev

På trykmålingerne i Kongerslev er der observeret en markant reduktion af det maksimale trykniveau ved pumpestart i perioden 7. oktober til 16. november 2014. På figur 4.4 ses en typisk trykmåling før og efter ændringen.



Figur 4.4. Målt trykniveau under pumpestart og -stop den 3. juni 2014 (tv) og den 15. oktober 2014 (th) i Kongerslev.

I målingen den 3. juni 2014 stiger trykniveauet ved pumpestart med cirka 20 mVs, mens trykniveauet den 15. oktober 2014 stiger med cirka 12 mVs. Denne reduktion genfindes som vist på figur 4.5 i cirka en måned, hvorefter trykket igen stiger med cirka 20 mVs ved pumpestart.



Figur 4.5. Udvikling af maksimal trykændring ved pumpestart.

Det er derudover værd at bemærke, at modtrykket er tilnærmelsesvist uændret i perioden, samt at trykniveauet ved pumpestop reduceres med cirka 20 mVs i begge pumpninger. Også denne tendens genfindes i de resterende trykmålinger. Som udgangspunkt vil analysemodellen fortolke ændringen som en reduceret ydeevne af pumpen og dermed beregne et øget slid af pumpen. Idet modtrykket er konstant, vil metoden desuden forudsige en øget ruhed af ledningen. Samtaler med driftspersonalet for pumpestationen har imidlertid afsløret, at årsagen til den markante reduktion er en ændring af pumpens startrampe. Under normal drift accelereres pumpen til 50 Hz ved de første sekunders pumpning, hvorefter pumpen nedbremses til en frekvens på 42 Hz. I forbindelse med vedligehold er denne startrampe i en periode ændret, således pumpen accelereres direkte til 42 Hz. Den 16. november 2014 er pumperne igen indstillet til at accelerere til 50 Hz med efterfølgende nedbremsning. Dette eksempel illustrerer vigtigheden af at have kendskab til ændringer i pumpesystemets drift, idet analyserne uden denne viden ville indikere øget strømningsmodstand i ledningen og dermed en fejlfortolkning af trykmålingerne.

4.3.3 Trykudbredelseshastighed i Kongerslev

Trykudbredelseshastigheden i ledningen kan som nævnt bestemmes ved at analysere svingningerne i trykniveau efter pumpestop. Den beregnede trykudbredelseshastighed i Kongerslev ved svingningsanalyse er illustreret på figur 4.6.



Figur 4.6. Beregnet trykudbredelseshastighed i pumpeledningen i Kongerslev ved analyse af svingningerne i trykniveau ved pumpestop.

Svingningsanalysen giver i gennemsnit en trykudbredelseshastighed på 485 ms^{-1} . I [9] er der rapporteret lignende udbredelseshastigheder baseret på trykmålinger i samme pumpestation. I målingerne omkring 11. november måles en lavere trykudbredelseshastighed, hvilket skyldes tilstædeværelsen af luft på ledningen. Disse målinger behandles yderligere i det følgende afsnit. Den teoretiske trykudbredelseshastighed for et Ø200 PE PN10-rør kan beregnes ved hjælp af eksempelvis [15] med tabelværdier for vandets og rørets elasticitet. Afhængigt af rørets indspænding fås en teoretisk bølgeudbredelseshastighed på mellem 225 ms⁻¹ og 250 ms⁻¹, hvilket er betydeligt lavere end den målte. Årsagen til denne markante afvigelse må principielt være en af følgende.

- 1. Ledningen er kortere end forventet.
- 2. Trykbølgen reflekteres opstrøms for udløbet.
- 3. Ledningen er stivere end forventet.

Det vurderes usandsynligt, at ledningens længde ikke er korrekt, idet det kræver, at ledningen reelt er cirka halv så lang som forventet. Det er desuden ikke sandsynligt, at udbredelseshastigheden overvurderes som følge af reflektion af trykbølgen, da en reflektion vil give anledning til en bagvedliggende svingning i trykmålingerne, fordi reflektionen ikke er fuldstændig. Den mest sandsynlige forklaring er derfor, at ledningen er stivere end forventet. Ledningens stivhed kan umiddelbart øges, hvis den omkringliggende jord påvirker ledningen ved dens radiale udvidelse. Normalt ses bort fra jordens virkning på systemets stivhed, fordi ledningens radiale udvidelser er hurtige, og jordskellettet derfor ikke forventes at kunne opbygge et jordtryk. [16] Den mest sandsynlige forklaring er, at ledningen ikke er udformet i PE men PVC, der har en markant større stivhed. Udregnes den teoretiske udbredelseshastighed for et PVC-rør med samme dimensioner fås således en værdi på 480 ms⁻¹, hvilket er tæt på den målte.

4.3.4 Lokalisering af luftlomme

Den 11. november 2014 er der på baggrund af pumpeovervågningen i Kongerslev opdaget en mulig luftlomme. På figur 4.7 ses det målte trykniveau ved pumpestart og -stop den 11. november 2014 og den 15. oktober 2014. Sidstnævnte trykmålinger repræsenterer en typisk trykmåling fra pumpestationen, som førstnævnte måling afviger betydeligt fra.



Figur 4.7. Trykniveauet ved pumpestart og -stop 11. november 2014 (tv) og 15. oktober 2014 (th) i Kongerslev.

Den første indikator af luft på ledningen er trykket før pumpestart, som er cirka 1,8 m lavere end normalt. Målingerne tyder ikke på, at det statiske tryk er faldende, så årsagen er ikke en utæt kontraventil. Det lavere trykniveau er sandsynligvis en konsekvens af tilstedeværelsen af en luftlomme på ledningen. Luftlommen vil reducere trykket ved pumpestationen, idet den specifikke tyngde af luft er væsentligt lavere end vands. Det reducerede trykniveau kan udnyttes til et groft estimat af luftlommens størrelse, idet 1,8 m rørstrækning har et volumen på 451.

Derudover ses der en bagvedliggende svingning ved pumpestop som sandsynligvis skyldes reflektion af trykbølgerne ved luftlommen. Begge disse tendenser er ikke til stede på trykmålingerne den 15. oktober, hvor der i dagene forinden har været kraftigt regnvejr, som har skyllet eventuelle luftansamlinger ud af ledningen. Analyse af trykmålingerne inden 11. november indikerer, at luften har været i ledningen siden 7. november, og luftlommen er synlig på målingerne indtil 16. november 2014. Den 17. november 2014 kører den ene pumpe i næsten en time på grund af regnvejrsafstrømning, hvilket fjerner den bagvedliggende svingning på målingerne. Det tyder derfor på, at luften er blevet skyllet ud af systemet. Typisk forudsættes fjernelseshastigheden for luft at være givet ved det empiriske udtryk. [16]

$$V = 0.6\sqrt{gD} \tag{4.1}$$

Hvor:

V	Luftfjernelseshastigheden	$[LT^{-1}]$
g	Tyngdeaccelerationen	$[LT^{-2}]$
D	Rørets diameter	[L]

I Kongerslev giver dette udtryk en fjernelseshastighed på 0.8 ms^{-1} , hvilket netop svarer til hastigheden ved normal drift. Ledningshastigheden skal desuden overskride fjernelseshastigheden i en tilstrækkelig lang periode, så luften kan blive transporteret ud af ledningen. Vandets hastighed udgør den øvre grænse for luftens hastighed, og hvis det antages, at luften er placeret i ledningens højdepunkt, kræver det sålededes som minimum en pumpevarighed på 10 minutter at fjerne luften. Under normal tørvejrsdrift pumpes der typisk i cirka 5 minutter, hvorfor luft sandsynligvis kun vil fjernes i perioder med øget belastning af pumpestationen. Luften er sandsynligvis kommet ind på ledningen gennem pumpesumpen, hvis sugledningens nedsænkning er blevet for lille. På figur 4.8 ses det beregnede frekvensspektrum for de to præsenterede trykmålinger. Frekvensspektret er udregnet med en Fast Fourier Transformation i Matlab. Egentligt forudsætter denne metode en tidsserie med stationær varians og middelværdi, hvilket ikke er overholdt for den under-dæmpede svingning i trykniveauet efter pumpestop. Metoden anvendes alligevel, idet der ikke lægges særligt vægt på størrelsen af variansen i frekvensspektret. [17]



Figur 4.8. Frekvensspektrum for trykmålinger ved pumpestop 11. november (tv) 2014 og 15. oktober 2014 (th) i Kongerslev.

Den 15. oktober er der et enkelt peak i frekvensspektret for en frekvens på 63 mHz. Hvis det antages, at denne frekvens svarer til svingningerne for trykbølgens forplantning gennem hele ledningen svarer dette til en trykudbredelseshastighed på 490 ms^{-1} . Denne hastighed afviger kun minimalt fra den beregnede hastighed ved svingningsanalyse på 475 ms^{-1} . Den 11. november er der dermod to svingninger med en frekvens på henholdsvis 36 mHz og 80 mHz. Frekvensspektret for de resterende trykmålinger med indikation af luft viser peaks ved tilnærmelsesvist samme frekvenser. På figur 4.9 er svingningerne i trykniveau modelleret som to under-dæmpede harmoniske svingninger med følgende forskrift.

$$H(t) = A \exp\left(-kt\right) \sin\left(2\pi f t + \phi\right) \tag{4.2}$$

Hvor:

H(t)	Trykniveau til tiden t	[L]
A	Svingningens amplitude	[L]
k	Dæmpningskoefficient	$[T^{-1}]$
f	Svingningens frekvens	$[T^{-1}]$
ϕ	Faseforskydning	[-]



Figur 4.9. Målte og modellerede svingninger i trykniveau ved pumpestop den 11. november 2014 i Kongerslev.

De to svingninger er modelleret med en amplitude på 20 mVs og frekvenser på henholdsvis 35 mHz og 78 mHz, og dæmpningskoefficienten for de to svingninger er kalibreret til 0.04 s^{-1} . I praksis ser det ud til at den ene svingning dæmpes hurtigere end den anden, idet der efter cirka 100 s kun er en svingning synlig. Dette stemmer overens med teorien om frekvensafhængig friktion. [15]

Både Fourier-analysen og tilpasningen af to harmoniske svingninger tyder på, at der er to svingninger. Ingen af de to frekvenser passer imidlertid på svingningstiden for udbredelse af trykbølgen i hele ledningen, idet de to frekvenser kræver trykudbredelseshastigheder på henholdsvist $275 \,\mathrm{ms}^{-1}$ og $625 \,\mathrm{ms}^{-1}$, hvilket ikke stemmer overens med resterende målinger på ledningen. Det er muligt, at en af frekvenserne stammer fra svingningen mellem luftlommen og vandvolumenet i ledningen opstrøms eller nedstrøms for lommen. Ved at betragte luftlommen som en fjeder og vandvolumenet som et lod kan den naturlige frekvens af svingningen af vandet bestemmes af følgende udtryk. [18]

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma PA}{mL}} \tag{4.3}$$

Hvor:

f	Svingnignens frekvens	$[T^{-1}]$
γ	Polytrofisk koefficient	[-]
P	Luftlommens starttryk	$[MT^{-2}L^{-1}]$
A	Rørets tværsnitsareal	$[L^2]$
m	Vandets masse	[L]
L	Luftlommens længde	[L]

På figur 4.10 ses den beregnede naturlige frekvens af svingningen mellem en luftlomme placeret på ledningens højdepunkt 1500 m fra pumpen og vandvoluminet opstrøms herfor. En luftlomme på 491 giver en naturlig frekvens af svingningen på 37 mHz. Svingningen af vandvolumenet opstrøms for luftlommen vil imidlertid være påvirket af kontraventilen, så det er usikkert om det er denne svingning, der kan genfindes i Fourier-analysen.



Figur 4.10. Naturlig frekvens for svingning mellem luftlomme vandmassen opstrøms herfor. Luftlommen er placeret på ledningens højdepunkt 1500 m fra pumpen.

Den naturlige frekvens af svingningen af vandvolumenet nedstrøms for luftlommen viser ikke nogen sammenhæng med nogle af de fundne frekvenser. Det mest sandsynlige er derfor, at de to frekvenser er en konsekvens af reflektionen ved luftlommen og således ikke direkte kan relateres til luftlommens volumen eller placering. Muligheden for at bestemme luftens placering og volumen mere præcist ved hjælp af computersimulering undersøges i det følgende afsnit.

4.4 Invers estimering

En anden måde at decifrere trykmålingerne og opnå viden om pumpesystemets tilstand er at sammenligne målingerne med en computersimulering. Trykstøds potentielt ødelæggende effekt på pumpesystemer har været kendt i over hundrede år, og der er derfor gennem tiden gjort store anstrengelser for at muliggøre modellering af trykstød. I dette afsnit kalibreres en beregningsmodel, der tager højde for effekten af luftlommer på ledningen, til trykmålingerne fra Kongerslev den 11. november 2014, hvor der er klare indikationer af luft på ledningen. Den teoretiske baggrund, forudsætningerne bag og implementeringen af modellen er beskrevet i bilag D. På figur 4.11 ses det modellerede trykniveau den 11. november 2014. I kalibreringen er der justeret på luftlommens startvolumen, luftlommens position, ledningens ruhed og pumpens start- og stoprampe. Pumpen er modelleret til at accelerere til 42 Hz på 3 sekunder, mens nedbremsningen sker på 7 sekunder. Ledningens ruhed er kalibreret på baggrund af det stationære modtryk til 0,1 mm og i beregningen er der placeret 501 luft på ledningens højdepunkt 1450 m fra pumpen.



Figur 4.11. Modelleret og målt trykniveau ved pumpestart og -stop den 11 november i Kongerslev. I modellen er der placeret 50l luft på ledningens højdepunkt.

Trykstødsmodellen er i stand til at modellere de første svingninger i trykniveauet efter pumpestop. Når den første undertryksbølge ved pumpestop rammer luftlommen vil den blive udvidet og reflektere trykbølgen delvist. Når den første undertryksbølge reflekteres til en overtryksbølge vil luftlommen blive sammenpresset og derfor virke som en fjedder, der mindsker trykniveauet ved det første overtryk. Når den næste overtryksbølge rammer vil luftlommen allerede være sammenpresset og derfor fås det største trykniveau ved anden overtryksbølge. Modellen er ikke i stand til at modellere friktionens dæmpning af trykbølgerne korrekt. Friktionen undervurderes primært fordi rørvæggen og væsken ikke opfører sig lineært elastisk og reversibelt, ligesom hastighedsprofilet i praksis ikke er fuldt udviklet i den oscillerende strømning. Langs rørvæggen i det laminære grænselag vil hastighedsvariationerne være i fase med trykniveaugradienterne i ledningen og hastigheden heri vil hurtigt ændres under passage af en trykbølge. Udenfor det laminære grænselag vil væsken på grund af interti ændre hastighed langsommere end væsken i det laminære grænselag. Det betyder, at hastighedsprofilet ikke er fuldt udviklet under den svingenede strømning og en kvasi-stationær forsimpling vil underestimere friktionen. [15] Det faktum, at kalibreringen sker på flere parametre giver en risiko for at løsningen ikke er entydig og skaber en usikkerhed på estimatet. Modellens estimat stemmer imidlertid overens med reduktionen i statisk trykniveau på 1,8 m svarende til et volumen på 45 l. En stor del af usikkerheden ved estimatet bør kunne reduceres ved at bestemme den slidte pumpes karakteristik og ledningens ruhed ved direkte estimering og anvende disse parametre i modellen.
4.5 Sammenligning af metoder

Den direkte estimering af trykniveauet i en række karakteristiske punkter og efterfølgende omsætning til tilstandsvariable har vist sig som en robust analysemetode. Gennem mønstergenkendelsen har det været muligt at analysere og detektere en række forskellige driftsforhold. Den væsentligste begrænsning i metoden er dens mulighed for at bestemme luftlommers position og volumen, idet det ikke har været muligt at relatere svingningerne i trykniveau direkte hertil, hvorimod det ved hjælp af computersimulering har det været muligt at bestemme en luftlommes position og volumen inverst. En væsentlig begrænsning i computersimuleringen er risikoen for at kalibreringen ikke er entydig, idet der kan kalibreres på en række parametre, der kan have ens effekt på trykniveauvariationerne. På baggrund af analyserne i kapitlet vurderes det at være mest hensigtsmæssigt at vurdere ledningens ruhed og pumpens slid ved hjælp af direkte estimering, som det allerede er sker i VTU-projektet. For at udvide metodens evne til at lokalisere luft kan metoden udvikles til også at udregne frekvensspektret for hver svingning i trykniveau ved pumpestop. Hvis analysen viser mere end ét peak i frekvensspektret kan en computersimulering autokalibreres til målingerne for at få viden om ledningens luftindhold.

Key Points

Omsætningen af trykmålinger til viden om pumpesystemets tilstand kan summeres i følgende key points.

- Trykmålingerne kan betragtes som pumpesystemets fingeraftryk, idet de kan omsættes til viden om pumpens slid, ledningens ruhed og lokalisering af luftlommer på ledningen. Det er derudover muligt at lokalisere utætte eller tilstoppede kontraventiler.
- Ændringer i pumpesystemets drift kan give anledning til fejlfortolkninger i overvågningen, hvis der ikke foreligger viden herom.
- Analyse af frekvensspektret for svingningerne i tryk ved pumpestop kan afsløre luftlommer på ledningen.
- Det er muligt at lokalisere luftlommens størrelse og position på ledningen ved computersimulering.
- Den nuværende overvågning kan forbedres ved at udregne frekvensspektret for trykniveaumålingerne efter hver pumpestop. Hvis frekvensspektret indikerer tilstedeværelse af en luftlomme kan dennes volumen og placering bestemmes ved computersimulering.

5. Hydraulisk rensning af pumpeledninger

Ved pumpning af spildevand over længere afstande er der ofte potentiale for store energibesparelser, hvis ledningshastigheden reduceres. I dette kapitel undersøges effekten af en hydraulisk rensning af en afskærende pumpeledning i Støvring, Nordjylland. Erfaringerne anvendes til en vurdering af muligheden for at energioptimere pumpesystemer ved en generel reduktion af ledningshastigheden kombineret med behovsstyret hydraulisk rensning baseret på trykmålinger.

5.1 Formål med hydraulisk rensning

I kloakpumpledninger er det ved projektering normal praksis at tilstræbe en ledningshastighed på mellem $0.8 \text{ og } 1 \text{ ms}^{-1}$. Kravet er primært baseret på erfaringer, idet der ved denne ledningshastighed normalt ikke opleves selvrensningsproblemer i pumpeledningen. En måde at undgå en øget aflejring af sediment i ledninger, der under normal drift ikke overholder dette krav, er at planlægge en regelmæssig rensning af pumpeledningen. Rensningen kan foregå mekanisk ved hjælp af en rensegris, der sendes gennem pumpesystemet og ved sin passage skubber sediment foran sig og desuden løsriver biofilm fra rørvæggen. Alternativt kan der foretages en hydraulisk rensning, hvor pumpesystemets maksimale kapacitet udnyttes til skylning af ledningen. Den hydrauliske rensning har den fordel, at der ikke kræves manuelt arbejde i forbindelse med udførslen af skylningen, hvorimod rensegrisen normalt skal afsendes og opsamles manuelt. Skylleprogrammet kan desuden automatiseres i pumpestyringen, således det igangsættes ved behov eller med faste intervaller. Som nævnt i kapitel 2 er der på især flade pumpeledninger potentiale for betydelige energibesparelser ved reduktion af ledningshastigheden. Udfordringen ved at nedsætte hastigheden er, at der i ledningen vil kunne ske en øget sedimentering og vækst af biofilm, som kan give anledning til en forøgelse af ledningens modtryk og dermed en reduktion af systemets kapacitet. På den måde bliver ledningens selvrensningsevne begrænsende for potentialet for energibesparelser ved reduktion af ledningshastigheden. Den hydrauliske rensning kan derfor få en central rolle i en energioptimering af pumpesystemer, hvis den på effektiv vis kan holde ledningen ren for sedimentaflejringer. For at undersøge skylleprogrammernes evne hertil analyseres effekten af en regelmæssig rensning af en afskærende kloakpumpeledning i Støvring.

5.2 Skylleprogrammet i Støvring

I Rebild Kommune transporteres en stigende andel af oplandets spildevand til rensning i Aalborg Kommune. Spildevandet fra Skørping, Støvring og en række oplandsbyer samles i en pumpestation på Ny Kærvej i Støvring, hvorfra det pumpes i en afskærende ledning til Annerup. På figur 5.1 ses pumpeledningens længdeprofil. [19]



Figur 5.1. Længdeprofil for pumpeledningen fra Ny Kærvej i Støvring til Annerup. De sorte punkter angiver placeringen af brønde. [20]

Ledningen ejes og vedligeholdes af Rebild Vand og Spildevand A/S og er udført omkring år 1980 i Ø500 mm PVC PN6-rør med en samlet længde på cirka 3200 m. Under normal drift skal pumperne overvinde en geometrisk løftehøjde på cirka 12 m. I tørvejrsdøgn transporteres cirka 2000 m³ spildevand og pumperne transporterer årligt omkring 900 000 m³ regn- og spildevand. I pumpestationen er der i år 1995 installeret to 35 kW Pumpex K252-CE4-pumper, ligesom der er installeret én 37 kW ABS-pumpe af ukendt type i år 1980. Den ene Pumpex-pumpe er harvareret i februar 2015 og derfor blevet erstattet af en lejet Flygt-3102.180 HT-pumpe med et 456-hjul. Karakteristisk for de installerede pumper er, at de er i stand til at transportere store vandmængder ved lavt modtryk.

ABS-pumpen yder cirka 100 ls^{-1} under normal drift svarende til en ledningshastighed på $0,60 \text{ ms}^{-1}$. Pumpex-pumperne er dimensioneret til at yde 180 ls^{-1} , hvilket giver en ledningshastighed på 1 ms^{-1} . Efter etableringen i år 1995 ydede pumperne imidlertid kun cirka 130 ls^{-1} , og i dag yder pumperne efter en justering cirka 110 ls^{-1} , svarende til en ledningshastighed på $0,65 \text{ ms}^{-1}$. Afvigelsen mellem den faktiske og forventede kapacitet skyldes en kombination af fejl i dimensioneringsforudsætningerne, hvor den geometriske løftehøjde er underestimeret, og slid af pumpen. På figur 5.2 ses den faktiske og den forventede pumpe- og ledningskarakteristik for pumpesystemet. Ledningskarakteristikken er beregnet med en effektiv ruhed på 0,8 mm



Figur 5.2. Forventet og faktisk pumpe- og ledningskarakteristik for pumpeledningen i Støvring. [20]

Konsekvenserne af de fejldimensionerede pumper blev i første omgang opdaget den 20. juni 2012 i forbindelse med udskiftning af en række tærede stålflanger i de forseglede brønde på ledningsstrækningen. Ved reperationen blev oplandets spildevand transporteret i tankvogne, mens ledningen blev tømt for vand. I denne forbindelse blev pumpeledningens linjeføring ændret, idet der skulle etableres en adgangsvej til et nyetableret boligområde i Støvring Ådale over en udluftningsbrønd. I det oversavede rør, som ses på figur 5.3, viste der sig at være et lag groft sediment i bunden af ledningen, ligesom pumpeledningens resterende tværsnit var belagt af en cirka 1 cm tyk biofilm. Som en konsekvens af denne opdagelse besluttede Rebild Vand og Spildevand A/S at spule ledningen ren for sedimentaflejringer i forbindelse med reperationen.

Pumperne har under normal drift sandsynligvis alterneret siden deres installation i år 1995. Der foreligger ikke viden om pumpebestykningen inden installationen af Pumpex-pumperne, men det er muligt, at ledningshastigheden aldrig har været over selvrensningskravet på cirka 0.8 ms^{-1} , og at sedimentet i ledningen derfor er en konsekvens af utilstrækkelig selvrensning gennem cirka 30 år. Det aflejrede sediment har ikke givet anledning til kapacitetsproblemer, da ledningen under normal drift har et forholdsvist beskedent tryktab. Sedimentaflejringerne forventes imidlertid at være årsagen til svolvbrinteproblemer i pumpeledningen. Som en del af aftalen med Aalborg Kommune om håndtering af spildevandet skal Rebild Vand og Spildevand A/S således overvåge svolvbrintekoncentrationerne i spildevandet. Overvågningen viser, at der er betydelig svovlbrintedannelse på ledningen, og Rebild Vand og Spildevand A/S skal derfor betale tillæg til afledningsafgifterne. Den primære motivation for at forhindre sedimentaflejringer i ledningen er derfor at reducere svovlbrintedannelsen.



Figur 5.3. Billede af opgravet Ø500 mm rørstykke fra pumpeledningen i Støvring den 20. juni 2012. [20]

Det ikke muligt at udskifte pumpehjulet i Pumpex-pumperne og dermed øge kapaciteten, da pumperne allerede er installeret med det størst mulige pumpehjul på 300 mm. Rebild Vand og Spildevand A/S overvejer i øjeblikket, om det vil være rentabelt at udskifte pumperne for på den måde at opnå en højere ledningshastighed og dermed forbedre selvrensningsevenen. I øjeblikket forsøges ledningen renholdt ved hjælp af et dagligt skylleprogram, hvor pumpestationens tre pumper startes samtidig. Forinden er startniveauet i pumpestationen hævet for at give ekstra vand til skylningen, og ledningshastigheden stiger under rensningen til cirka $1,1 \text{ ms}^{-1}$. I pumpestationen på Ny Kærvej har der været foretaget en kontinuert overvågning af trykniveauet ved pumpestart- og stop siden januar 2013. Målingerne foretages af en analog trykmåler med en målefrekvens på 1 Hz. Pumpernes strømforbrug og vandføring registrerers desuden med samme målefrekvens. Renseprogrammet blev igangsat i marts 2014, og effekten af renseprogrammet vurderes på baggrund af den historiske udvikling af ledningens ruhed. I en række udvalgte pumpninger er modtrykket og vandføringen ved stationær drift bestemt og omsat til en ækvivalent sandruhed ved hjælp af Darcy-Weisbachs modstandsformel og Colebrook & Whites udtryk for friktionstallet. [21] På figur 5.4 ses den beregnede ruhed for hver pumpecyklus. Trykmåleren har været ude af drift fra slutningen af februar 2014 til 24. september 2014, så det har ikke været muligt at anvende målinger fra denne periode.



Figur 5.4. Beregnet ækvivalent sandruhed baseret på direkte måling af driftspunktet.

Der er en forholdsvist stor variation i den beregnede sandruhed indenfor den samme dag, hvilket først og fremmest skyldes, at trykmålingerne kun er tilgængelige som billedfiler, og derfor skal aflæses manuelt, hvilket giver en forholdsvist stor usikkerhed på aflæsningen af modtrykket og vandføringen, idet pixelstørrelsen bestemmer målenøjagtigheden. Usikkerheden på trykket vurderes at være $\pm 5 \text{ cmVs}$, mens usikkerheden på vandføringen vurderes at være cirka $\pm 5 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$. I tabel 5.1 ses sensitiviteten af den beregende sandruhed i en pumpecyklus den 26. september 2014. Sensitivitetsanalysen viser, at usikkerhed på aflæsningen kan forklare en variation på $\pm 20 \%$ omkring middelværdien, og at usikkerhed i måleaflæsning dermed forklarer den daglige variation i den beregende ruhed. Selvom dataformatet begrænser analysens datagrundlag, fordi det ikke er muligt at automatisere aflæsningen med mønstergenkendelse, analyseres mellem 5 og 6 pumpecykler for hver måledag, og det er derfor muligt at frafiltrere en stor del af usikkerheden ved at betragte middelruheden for hver dag.

		Mod 314	tryk [c 319	mVs] 324
Vandføring	382	1,15	1,23	1,31
$[\mathrm{m}^3~\mathrm{h}^{-1}]$	392	0,93	1,11 1,00	$1,10 \\ 1,06$

Tabel 5.1. Påvirkningen af usikkerheden i aflæsningen af vandføring og tryk på den beregende sandruhed [mm] baseret på en pumpecyklus den 26. september 2014.

Normalt forventes et nyt PVC-rør at have en ækvivalent sandruhed på mellem 0,01 og 0,6 mm. [21] Det er usikkert, om rensningen den 20. juni 2012 har reduceret ledningens ruhed til dette niveau, da der ikke foreligger trykmålinger umiddelbart efter rensningen. I 2013 har ledningen været påvirket af luftansamlinger, som sandsynligvis bidrager til variationerne i den beregnede strømningsmodstand i ledningen. De lave ruheder i efteråret 2013 kan således fortolkes som en konsekvens af, at efterårets regnhændelser har skyllet luften ud af systemet.

Analysen af den hydrauliske rensnings effekt indikerer, at renseprogrammet ikke på effektiv vis kan holde ledningen ren for permanente sedimentaflejringer, idet pumpeledningens ruhed har været stigende siden september 2013. Under renseprogrammet er der en bundforskydningsspænding på cirka 3,5 Pa i ledningen, hvilket normalt betragtes som tilstrækkeligt for selvrensning. [22] Årsagen til den manglende effekt af skyllesystemet er sandsynligvis, at der ikke pumpes længe nok til at rensningen kan påvirke sedimentaflejringerne i ledningen. Der kan således kun pumpes cirka 2 minutter under renseprogrammet, selvom startniveauet hæves inden renseprogrammet igangsættes. Den fysiske forklaring på, at det kortvarige renseprogram ikke har den ønskede effekt er sandsynligvis, at det bundfældede sediment ved den lavere ledningshastighed under normal drift har opbygget en øget friktionsstyrke som følge af kompaktering og konsolidering. Det betyder, at der kræves en forholdsvist stor forskydningspåvirkning for at løsrive partiklerne i sedimentlaget. Typisk forudsættes sedimenttransporthastigheden at være proportional med forskellen mellem den faktiske og kritiske bundforskydningspænding, og et kort skylleprogram vil derfor betyde, at programmet ikke har den ønskede effekt.

Ud fra analysen er det imildertid ikke muligt at konkludere, at renseprogrammet er fuldstændigt uden effekt, idet der ikke foreligger målinger fra længere perioder uden regelmæssig skylning at sammenligne med. Det er således muligt, at renseprogrammet bevirker, at sedimentlaget i ledningen ikke når samme niveau, som det var ved rensningen af ledningen den 20. juni 2012, fordi skyllesystemet medfører en regelmæssig løsrivelse og transport af det aflejrede sediment. Den mest hensigtsmæssige løsning på selvrensningsproblemerne er derfor at bibeholde renseprogrammet og fokusere på at finde en langsigtet løsning på problemerne. I bilag E er der undersøgt forskellige tiltag til at løse pumpesystemets driftsproblemer, herunder muligheden for at forkorte pumpernes stoprampe og ændre pumpebestykningen. I det følgende afsnit undersøges betydningen af skylleprogrammets varighed gennem en analyse af regnbetingede skylninger i Tvis, Vestjylland.

5.3 Regnbetinget skylning i Tvis

Pumpesystemet i Tvis transporterer som nævnt i kapitel 2 en blanding af regn- og spildevand fra byens delvist separerede opland til rensning på Holstebro Centralrenseanlæg. Det betyder,

at pumpestationen oplever en forholdsvist stor variation i tilstrømningen til pumpesumpen. Den daglige spildevandsstrøm transporteres af pumpestationens 11 kW Flygt-pumpe, som suppleres af en 21 kW ABS-pumpe under regn. Denne opsætning betyder, at der sker en hydraulisk skylning af pumpeledningen, når det regner i pumpestationens opland. I modsætning til i Støvring er skylningen således ikke planlagt, idet den kun forekommer ved større regnhændelser. For at undersøge effekten af denne skylning undersøges sammenhængen mellem sæsonvariationen i ledningens ruhed og faldne regnmængder i oplandet i en periode fra 22. maj til 25. september 2014. I pumpestationen er der ikke installeret en vandføringsmåler, så ruheden bestemmes på baggrund af trykmålingerne ved pumpestart som beskrevet i kapitel 4. Regnmængderne bestemmes på baggrund af SVK-regnmåler nummer 5285, som er placeret på Holstebro Centralrenseanlæg. Afstanden mellem pumpestationen og måleren er cirka 8 km, så der kan forventes afvigelser mellem nedbøret i pumpestationens opland og målingerne. Til formålet vil mindre afvigelser imidlertid ikke være af større betydning. På figur 5.5 ses den beregnede udvikling af ruheden af ledningen i Tvis i løbet af sommeren 2014. På samme figur er målte regnintensiteter afbilledet. I løbet af juni og juli falder der kun beskedne regnmængder, hvilket betyder, at pumpestationen hovedsageligt pumper spildevand fra oplandet. I denne periode har ledningen en forholdsvist stor ruhed, som sandsynligvis skyldes sedimentaflejringer og belægninger på rørvæggen.



Figur 5.5. Beregnet udvikling af den ækvivalente sandruhed af pumpeledningen i Tvis samt regnintensitet fra SVK 5285-måleren.

I midten af juli reduceres ledningens ruhed til et niveau, som er typisk for PVC-rør. Den 13. og 14. juli 2014 er der målt tilnærmelsesvist uafbrudt lavintens frontregn, og på pumpeovervågningen

den 14. juli 2014 ses, at begge pumpestationens pumper kører samtidigt i minimum 30 minutter, indtil pumpeovervågningen stoppes klokken 10. På figur 5.6 ses trykmålingen fra den pågældende dag. Da det ikke har været muligt at fremskaffe en pumpekarakteristik for ABS-pumpen, er det ikke muligt at beregne ledningshastigheden, når begge pumper starter. Målingerne tyder imidlertid på, at den regnbetingede skylning har kunnet fjerne de aflejringer, som har givet anledning til en øget strømningsmodstand i løbet af sommeren.



Figur 5.6. Målt tryk i pumpestationen i Tvis den 14. juni 2014.

5.4 Energioptimering med hydraulisk rensning

Baseret på erfaringerne fra de regnbetingede skylninger i Tvis er det tydeligt, at renseprogrammet i Støvring er begrænset af pumpesumpens magasineringsvolumen, som kun tillader et renseprogram på 2 minutter, selvom startniveauet forinden er hævet. Dette vil være tilfældet i mange eksisterende kloakpumpesystemer, fordi pumpesumpene er designet med henblik på fungere optimalt med en ledningshastighed på omkring 0.8 ms^{-1} .

I eksisterende anlæg vil energibesparelsen ved en lavere driftshastighed sandsynligvis ikke kunne forrente en investering i et større magasineringsvolumen i pumpesumpen. I Støvring vil det eksempelvis kræve et magasineringsvolumen på omkring 350 m^3 , hvis renseprogrammet skal have en varighed på 30 minutter. En billigere løsning i eksisterende systemer kunne være at tilsætte yderligere vand til pumpesumpen under rensningen. Det vil imidlertid være vanskeligt at få tilstrækkeligt med vand fra forsyningsnettet, ligesom det er usandsynligt at få tilladelse til at oppumpe vand fra vandløb og søer. I Støvring løber Mastrup Bæk eksempelvis forbi pumpestationen, men da dette vandløb er fredet, er det ikke realistisk at kunne opsamle vand herfra under rensningen. En normal brandhane kan maksimalt yde 25 l s^{-1} når forsyningsnettet er dimensioneret hertil, og da pumperne under renseprogrammet i Støvring yder cirka 195 ls^{-1} er det ikke muligt at forlænge renseprogrammets varighed signifikant, selvom der blev tilsat vand fra forsyningsnettet.

Hvis den hydrauliske rensning på effektiv vis skal implementeres i pumpesystemerne kræves derfor en revurdering af den nuværende praksis for projektering af pumpestationer. Hvis der i stedet for de traditionelle pumpesumpe etableres sparebassiner, vil det være muligt at tilbageholde så store mængder spildevand, at en hydraulisk rensning kan have en effekt på ledningens ruhed. For at holde sparebassinet rent kan der med fordel installeres spulepumper med luftindblæsning, der i Ballen ved Skanderborg eksempelvis har vist sig at kunne holde bassinet rent og samtidig medføre en betydelig omsætning af organisk stof i sparebassinet. [23] På figur 5.7 ses et billede af sparebassinet i Ballen, hvor der er installeret to 5,9 kW Flygt jet areator-pumper.



Figur 5.7. Billede fra drift af spulepumper med luftindblæsning i Ballen ved Skanderborg [23].

Omsætningen af organisk stof vil have betydning for spildevandets sammensætning på renseanlægget, hvor det organiske stof normalt anvendes til biologisk omsætning af kvælstof og fosfor. Fordelen ved denne metode er imidlertid, at svovlbrintedannelse hæmmes betydeligt af den manglende tilstedeværelse af letnedbrydeligt organisk stof efter sparebassinet. Endeligt giver de store sparebassiner mulighed for at tilrettelægge pumpningen, således der eksempelvis pumpes mest om natten, hvor strømmen er billigst. På figur 5.8 ses et eksempel på døgnvariationen i elpriser den 11. maj 2015, hvor vinden stod i syd med en styrke på omkring 8 ms^{-1} . På den pågældende dag er strømmen på Sjælland eksempelvis dobbelt så dyr mellem klokken 8 og 9, som den er om natten mellem klokken 3 og 4. I øjeblikket afregner forsyningsselskaberne ikke el på timebasis, da det kræver mere avancerede elmålere, som dog teknisk set ikke er vanskelige at installere og i fremtiden sandsynligvis vil vinde indpas.



Figur 5.8. Timepriser for strøm på Nord Pool Spot A/S i det vestlige (tv) og østlige (th) Danmark den 11. maj 2015.

Hvordan det overordnede driftsregnskab for sådan et system ser ud er uvist og eksemplet har

blot til formål at illustrere, at det på nuværende tidspunkt er vanskeligt at implementere den hydrauliske skylning som en del af en energioptimeret pumpedrift i eksisterende anlæg, men at det i fremtiden kan blive en del af pumpesystemers design, hvis den nuværende kloakstruktur i Danmark revurderes.

Key Points

Undersøgelsen af muligheden for at rense en pumpeledning hydraulisk kan summeres i følgende key points.

- I pumpeledninger vil der med tiden udvikle sig sedimentaflejringer og biofilm på rørvæggen, som kan forøge modtrykket i pumpeledningen og dermed nedsætte systemets kapacitet. Aflejringerne kan desuden give anledning til problemer med svovlbrintedannelse.
- For at reducere dannelsen af sedimentaflejringer og biofilm i kloakpumpeledninger designes systemerne normalt efter en ledningshastighed på 0.8 til 1 ms^{-1} , idet der ved disse hastigheder erfaringsmæssigt ikke er problemer med selvrensning.
- En pumpestation i Støvring lever på grund af en fejldimensionering af pumperne ikke op til disse selvrensningskrav. Som en konsekvens af utilstrækkelig selvrensning gennem minimum 20 år har det i år 2012 været nødvendigt at spule ledningen ren for betydelige mængder sediment.
- I et forsøg på at holde ledningen ren er der efterfølgende igangsat en daglig hydraulisk rensning af pumpeledningen, hvor pumpestationens tre pumper startes samtidigt.
- Erfaringerne med hydraulisk rensning i Støvring er interessant i forhold til driftsoptimering, fordi det kan afsløre om det er muligt at reducere ledningshastigheden i pumpesystemer uden en forøgelse af strømningsmodstanden, hvis der foretages en regelmæssig hydraulisk skylning af systemet.
- Undersøgelsen viser, at renseprogrammet ikke er i stand til at holde ledningen ren for sediment, idet ledningens ruhed har været stigende siden september 2013.
- Årsagen til den manglende effekt er sandsynligvis, at pumpesumpens magasineringsvolumen maksimalt tillader, at renseprogrammet kan vare cirka 2 minutter. Renseprogrammet er således for kort til på effektiv vis at kunne løsrive det bundfældede sediment i ledningen.
- I eksisterende anlæg er det vanskeligt at energioptimere driften ved anvendelse af hydraulisk rensning, fordi det kræver anlægsomkostninger til forøgelse af pumpesumpenes magasineringsvolumen. Ved nyanlæg er der bedre mulighed for at implementere den hydrauliske rensning i designprocessen for på den måde at muliggøre en energioptimering.

6. Luftindblæsning i kloakpumpeledninger

Spildevandet i lange pumpeledninger har ofte uhensigtsmæssigt store opholdstider, hvilket giver anledning til svovlbrintedannelse. De producerede svovlbrinte er en stor kilde til problemer for forsyningsvirksomhederne, idet de skaber lugtgener ved oppumpningsbrønden og forkorter levetiden af betonrør og -brønde nedstrøms for pumpeledningen. I dette kapitel undersøges muligheden for at reducere svovlbrintedannelse ved indblæsning af trykluft i pumpeledninger.

6.1 Formålet med luftindblæsning

Svovlbrinte er en naturligt forekommende farveløs, giftig og brændbar gas, som selv ved lave koncentrationer på omkring 0,5 ppm har en ubehagelig lugt af rådne æg og ved koncentrationer over 300 ppm er livsfarlig. Svovlbrinten dannes som et restprodukt, når sulfatreducerende bakterier omsætter det organiske stof i spildevandet under anvendelse af sulfat som elektronacceptor. De sulfatreducerende bakterier kræver iltfrie forhold, og svovlbrintedannelse sker derfor primært i fuldtløbende kloakledninger. I delfyldte gravitationsledninger tilfører kloakatmosfæren ilt til spildevandet på grund af genluftning og forhindrer derved iltfrie forhold. I fuldtløbende ledninger er spildevandet afskåret fra ilttilførslen, hvorfor der hurtigt opstår iltfrie forhold i spildevandet, hvor der typisk sker en overmætning af svovlbrinte i pumpeledningen, som frigives i oppumpningsbrønden. På betonvæggen omdannes svovlbrinten mikrobiologisk til svovlsyre, som korroderer betonvæggen. [22] Indblæsning af trykluft i en kloakpumpeledning medvirker til svovlbrintebekæmpelse på to forskellige måder.

- 1. Den indblæste trykluft fortrænger en del af ledningens spildevand og reducerer dermed den hydrauliske opholdstid. Reduktionen vil nedsætte svovlbrintekoncentrationen i spildevandet ved oppumpningsbrønden, da de svovlbrintereducerende bakterier har kortere tid til at danne svovlbrinte under spildevandets transport gennem ledningen.
- 2. Luftlommerne i ledningen belufter spildevandet på samme måde som det sker i gravitationsledninger. På den måde reduceres spildevandets iltfrie opholdstid, hvorved de sulfatlreducerende bakteriers aktivitet begrænses.

Den traditionelle metode til svovlbrintebekæmpelse er tilsætning af kemikalier, som hæmmer svovlbrintedannelse eller udfælder dannede sulfider. Eksempler herpå er natriumhydroxid, jernnitrat, jernsulfat og calciumnitrat, som ofte sælges under kommercielle produktnavne som eksempelvis Nutriox. [24] På andre kloakpumpeledninger bekæmpes svovlbrintedannelse ved hjælp af rensegrise, der med regelmæssige intervaller sendes gennem pumpeledningen. Rensegrisen løsriver kloakhuden, hvor de svovlbrintereducerende bakterier primært befinder sig, hvorved svovlbrintedannelsen i en periode hæmmes, mens rørvæggen igen inkuberes af mikroorganismer. [25]

I forhold til disse metoder til svovlbrintebekæmpelse har luftindblæsningen en række fordele.

- Kemikalietilsætning kræver etablering af tank-og doseringsanlæg, som er dyrere end indkøb af en værkstedskompressor.
- Der er ingen behov for regelmæssig indkøb af kemikalier ved luftindblæsningen.
- Tankanlæg til magasinering af kemikalier skal årligt tæthedsprøves for at lokalisere eventuelle utætheder. Kun kompressorer med et produkttal (tankvolumen i liter gange tanktryk i bar) over 1000 skal kontrolleres regelmæssigt, hvilket betyder at langt de fleste kompressorer til luftindblæsning ikke kræver kontrol.
- En overdosering af luftindblæsning har ingen miljømæssige konsekvenser, da luften forlader spildevandet i oppumpningsbrønden.
- Rensegrisen skal normalt afsendes og opsamles manuelt, hvorimod luftindblæsningen kan automatiseres ved hjælp af pumpestationens SRO-anlæg og dermed reduceres behovet for besøg i pumpestationen.
- Ved anvendelse af rensegrise er der risiko for, at grisen sætter sig fast i ledningen. Hvis en rensegris sidder fast i ledningen er det vanskeligt at fjerne den igen.

Ovenstående fordele indikerer, at luftindblæsning potentielt er billigere end svovlbrintebekæmpelse med kemikalier eller rensegrise i både anlæg og drift. Den typiske udgift til svovlbrintebekæmpelse ved tilsætning af jernsalte er eksempelvis angivet til mellem 28 og 55 kr (kgS)⁻¹ afhængigt af dosering, kemikaliepris og fjernelsesgrad. [24] Mariagerfjord Vand A/S har i forbindelse med et udviklingsprojekt med Grundfos opgjort, at der i én pumpestation på Skivevej i Hobro uden optimering af doseringen årligt blev brugt cirka 30 000 kr på indkøb af jernsulfat. På grund af en defekt vandføringsmåler kendes pumpestationens årlige tilløbsmængde ikke nøjagtigt, men ifølge driftsleder Brian Frost er den mellem 30 000 og 60 000 m³. Inden optimeringen blev der derfor brugt mellem 0,5 og 1 kr m⁻³ til svovlbrintebekæmpelse i denne pumpestation. Efter optimeringen blev det årlige forbrug af kemikalier reduceret til en tredjedel. I 2015 betaler forbrugerne i Mariagerfjord Kommune inklusive moms 46,3 kr m⁻³ vand, hvoraf de 33 kr udgør betaling for spildevandshåndtering. [26] Baseret på denne opgørelse bruges en forholdsvist stor del af betalingen for spildevandshåndtering til svovlbrintebekæmpelse ved kemikalietilsætning. Omvendt bruger kompressoren strøm, ligesom luft i kloakpumpeledninger erfaringsmæssigt kan medføre en række driftsproblemer. [27]

- Hvis den indblæste luft samler sig i større luftlommer i højdepunkter på ledningen kan de øge ledningens modtryk og dermed nedsætte pumpernes ydelse.
- Luftlommer kan afhængigt af størrelse og placering påvirke trykstød ved pumpestart og -stop. Erfaringsmæssigt vil især små luftlommer forværre trykstød, mens store luftlommer virker beskyttende på ledningen, idet de tilfører en stor elasticitet til ledningen.
- Den indblæste luft giver anledning til en ujævn tilstrømning til oppumpningsbrønden, fordi luften udvider sig ved dens transport gennem ledningen.
- Den indblæste luft kommer i tæt kontakt med spildevandet og kan derfor medføre lugtgener ved oppumpningsbrønden.

Specielt kan nedsættelsen af pumpens ydelse medføre et øget energiforbrug, som sammen med kompressorens strømforbrug vil udgøre den primære omkostning ved at anvende luftindblæsning til svovlbrintebekæmpelse. Et af de første rapporterede forsøg med anvendelse af luftindblæsning til svovlbrintebekæmpelse i kloakpumpeledninger er præsenteret i [28] På baggrund af målinger af luftens påvirkning på iltkoncentrationen i oppumpningsbrønden og ledningens modtryk anbefales det, at indblæse luft med et luft/vand-forhold på mellem 0,3 og 0,7. Det amerikanske miljøagentur, EPA, har udgivet en række retningslinjer for forhinding af korrison og lugtgener

i kloaksystemer, hvor luftindblæsning nævnes som en mulig løsning. Det anbefales her, at luftindblæsningen dimensioneres på baggrund af betragtninger af iltbehovet i ledningen, således unødigt store indblæsningsmængder undgås, idet de vil betyde en øget omsætning af letomsætteligt organisk stof, som kan påvirke fjernelsen af kvælstof og fosfor på renseanlægget. [29] Retningslinjerne er anvendt til dimensionering af luftindblæsning i en kloakpumpeledning i Japan, hvor det ved hjælp af modellering af omsætningen af organisk stof i pumpeledningen er lykkedes at optimere luftindblæsningen, således svovlbrintedannelse forhindres uden unødig stor omsætning af organisk stof. [30]. En rundspørge hos flere af forsyningsvirksomhederne i Jylland har vist, at der er meget blandede erfaringer med luftindblæsning i pumpeledninger. Eksempler på forskellige erfaringer er listet nedenfor.

- I Rebild Vand og Spildevand A/S indblæses luft i flere kloakpumpeledninger. Luften giver driftsproblemer, men fordi luften på effektiv vis fjerner svovlbrintedannelsen bibeholdes metoden.
- I Mariagerfjord Vand A/S indblæses luft i tre kloakpumpeledninger med rørdimensioner på 90mm, 160mm og 315mm. Her rapporteres om et relativt stort elforbrug efter igangsætningen.
- I Ikast-Brande Spildevand A/S har der i perioder været udført forsøg med luftindblæsning på strækninger med svolvbrintedannelse, men på grund af omfattende driftsproblemer anvendes metoden ikke længere. Der tilsættes i stedet kemikalier til spildevandet i pumpeledninger med svovlbrinteproblemer.

De blandede erfaringer med luftindblæsningen er sandsynligvis en konsekvens af, at der ikke foreligger nogle generelle erfaringer og retningslinjer for hvornår metoden er anvendelig i forhold til drift af pumpesystemer. Derfor undersøges effekten af luftindblæsning i en kloakpumpeledning i Gerå, Nordjylland.



Figur 6.1. Terrænprofil langs pumpeledningens linjeføring fra Gerå til Asaa. [31]

6.2 Luftindblæsning i Gerå

Brønderslev Forsyning A/S etablerede i år 2010 en pumpestation i Gerå, som pumper spildevand til Asaa. Ledningen er udført i Ø110mm PE PN10-rør med en samlet længde på 2690m og har ved normal drift en geometrisk løftehøjde på cirka 5 m. Det har ikke været muligt at fremskaffe et længdeprofil for ledningen, men ifølge ledningens driftsansvarlige følger ledningen terrænet, som er illustreret på figur 6.1. Idet ledningen er udført i bløde PE-rør vil en del af terrænets variationer blive udlignet på grund af kravet til mindste krumningsradius af rørene. I pumpestationen er der installeret to tørtopstillede ABS AFC 0835-pumper, som er dimensioneret til at yde $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, hvilket svarer en hastighed på $1,1 \text{ ms}^{-1}$ i ledningen. I pumpestationen er der installeret en elektromagnetisk vandføringsmåler, som viser, at pumpeydelsen stemmer overens med dimensioneringskriteriet. Efter etableringen af ledningen modtog Brønderslev Forsyning A/S klager om lugtgener nær oppumpningsbrønden i Asaa på grund af svovlbrintedannelse i ledningen. For at afhjælpe lugtgenerne blev der tilføjet en kompressor i pumpestationen i Gerå. På figur 6.2 ses den anvendte Reno FF 705/150 5 kW stempelkompressor til indblæsningen af luft. Kompressoren koster DKK 13.900 excl. moms og har et tankvolumen på 150 l, som er indstillet til at have et tryk på 7 barg. Efter endt pumpning åbner en magnetventil for et separat 1/2-tommer tilløb til pumpeledningen, hvorved der indblæses trykluft i ledningen i 70 sekunder. Ved hjælp af svovlbrintemålinger i oppumpningsbrønden er det efterfølgende konstateret, at luftindblæsningen har fjernet svovlbrintedannelsen.



Figur 6.2. Den anvendte stempelkompressor til indblæsning af luft i pumpeledningen er produceret af Reno FF og er en model 705/150 med et slagvolumen på $705 \, \mathrm{l \, min^{-1}}$ og et tankvolumen på 150 l.

For at analysere effekten af luftindblæsningen er der den 21. januar 2015 foretaget en kortvarig måling af trykket på ledningen i seks pumpecykler. Målingerne er foretaget med en digital GS4200-USB trykstransducer med en opsamlingsfrekvens på 5 Hz. Der er efterfølgende foretaget en overvågning af trykniveauet i pumpestationen fra den 16. marts 2015 til den 8. april 2015 med den konstruerede målekasse præstenteret i kapitel 3. I den første og sidste uge har luftindblæsningen fulgt den normale drift, mens der i den anden uge er slukket for luftindblæsningen. På figur 6.3 ses en typisk måling af trykket i en pumpecyklus med luftindblæsning.



Figur 6.3. Målt relativt trykniveau i en pumpecyklus den 21. januar 2015. Trykmåleren er placeret cirka 1,5 m over pumpen og målingerne er ikke korrigeret herfor.

Pumperne har en forholdsvist stor start- og stoprampe for at reducere trykstød. Ramperne er forøgede ved implementeringen af luftindblæsningen, fordi luft erfaringsmæssigt kan forværre trykstød. Det største trykniveau i ledningen på cirka 40 mVs forekommer umiddelbart efter magnetventilen åbnes og luftindblæsningen igangsættes. Idet pumpeledningen er udformet i PN10-rør, vil dette overtryk sandsynligvis ikke give anledning til nævneværdig udmattelse af røret, idet amplituden ikke overstiger 60 % af rørets trykstyrke. [16] Baseret på målingerne giver luftindblæsningen altså ikke anledning til problemer i forhold til trykstød. Dette underbygger forventningen om at den indblæste luft i ledningen virker beskyttende mod trykstød.

6.2.1 Forhindring af iltfrie forhold

Den indblæste luft vil fortrænge vand fra pumpeledningen og dermed reducere vandets hydrauliske opholdstid. Reduceringen af opholdstiden er bestemt af indblæsningsmængden i løbet af de cirka 70 sekunder, hvor magnetventilen er åbnet. I bilag F er indblæsningsmængden i hver pumpecyklus estimeret til 1500 L atmosfærisk luft, som når indblæsningen stoppes optager et volumen på cirka 5201 i pumpeledningen. Luften vil udvide sig efter endt indblæsning, og umiddelbart inden pumpen igen startes har luftlommen udvidet sig til cirka 7401. Kompressorens ydelse er baseret på målinger ved standardiserede forhold, så hvis kompressoren ikke lever op til angivelserne, eksempelvis på grund af slid, vil det indblæste volumen være overstimeret. Beregningen forventes dog at være tilstrækkelig nøjagtig til at danne grundlag for en vurdering af luftindblæsningens påvirkning af opholdstiden i ledningen. Baseret på overvågningen af trykket i pumpestationen starter pumperne i gennemsnit 55 gange i døgnet, når det ikke regner i oplandet. Pumpestationens elektromagnetiske vandføringsmåler viser, at én pumpning indeholder cirka 600 l spildevand. Det betyder, at spildevandets gennemsnitlige opholdstid inden luftindblæsningen var cirka 18 timer. Ved hjælp af luftindblæsningen er denne opholdstid tilnærmelsesvist halveret til cirka 9 timer. Udover at reducere den hydrauliske opholdstid vil luftindblæsningen som nævnt også belufte spildevandet. Ved et besøg i pumpestationen den 16. marts 2015 er der klokken 10:30 målt iltkoncentration i pumpesumpen med en WTW Multiline P3 pH/Oximeter. Iltkoncentrationen i oppumpningsbrønden varierede på måletidspunktet mellem 3,4 og $4,3 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$. I pumpesumpen er der tilløb fra Gerås kloaksystem og fra en pumpeledning fra en sydlig oplandsby, hvor der også indblæses luft under drift. De laveste værdier af iltkoncentrationen blev målt, når der løb vand i tilløbet fra pumpeledningen. Det har ikke været muligt at foretage iltmålinger i oppumpningsbrønden, fordi iltelektroden ikke kan blive nedsænket i spildevandsstrømmen. Lugten i oppumpningsbrønden indikerer imidlertid, at der ikke har været iltfrie forhold i ledningen. Selvom spildevandets fortyndingsgrad og hidtidige transporttid har stor betydning for spildevandets iltforbrug anvendes typiske værdier for biologisk oxygenforbrug, BOD, i råspildevand målt i laboratorie ved 20 °C til en overslagsberegning over iltforbruget i pumpeledningen. På figur 6.4 ses målingerne af BOD og en tilpasset asymptotisk vækstmodel, som forudsættes at beskrive iltforbruget i pumpeledningen.



Figur 6.4. Model for biologisk oxygenforbrug, BOD, i råspildevand baseret på målinger for typisk råspildevand angivet i [32].

Hvis det antages, at omsætningshastigheden fordobles ved en temperaturstigning på 10 °C, vil iltforbruget i kloakledningen være omtrent halvdelen af målingerne ved laboratorieforhold. Inden luftindblæsningen blev igangsat var opholdstiden i ledningen cirka 18 timer svarende til et iltforbrug på cirka 32 mg O₂ l⁻¹ i ledningen. Luftindblæsningen har reduceret opholdstiden til cirka 9 timer svarende til et oxygenforbrug på cirka 17 mg O₂ l⁻¹ i ledningen. Overslagsberegningen viser, at reduceringen af den hydrauliske opholdstid ikke alene fjerner svovlbrintedannelse, idet der i løbet af de 9 timer vil opstå iltfrie forhold. Idet der indblæses 1500 l atmosfærisk luft for hver 600 l spildevand er der et beluftningspotentiale på cirka 750 mg O₂ l⁻¹. Selvom ilttilførslen til spildevandet i praksis er begrænset af diffusion, er iltningspotentialet så stort, at der langt overskrider iltbehovet i ledningen, og beluftningen er dermed den vigtigste mekanisme i forhindringen af svovlbrintedannelse i ledningen.

6.2.2 Energiforbrug

I forbindelse med etableringen af luftindblæsningen i Gerå er der foretaget overvågning af pumpestationens energiforbrug. Inden indblæsningen blev igangsat brugte pumpestationen cirka 25 kWh i døgnet. Kompressoren bruger cirka 5 kWh i døgnet, men på grund af luftindblæsningen er pumpernes energiforbrug reduceret til cirka 20 kWh i døgnet. Elmålingerne indikerer, at kompressoren dels er effektiv til at flytte vandet, men også, at luften øger pumpens ydelse. Pumperne i pumpestationen starter i gennemsnit 55 gange i døgnet, og da der i hver pumpning transporteres cirka 6001 svarer strømmålingen til et specifikt energiforbrug til pumpning af vandet på cirka $0.6 \,\mathrm{kWh} \,\mathrm{m}^{-3}$. Det høje energiforbrug til pumpning skyldes den høje driftshastighed på $1,1 \text{ ms}^{-1}$, som giver anledning til et stort friktionstab. Luftindblæsningen fortrænger cirka 740 l vand ved hver indblæsning, hvilket svarer til et specifikt energiforbrug på 0,125 kWh m⁻³. Normalt har stempelpumperne i en kompressor en forholdsvist høj virkningsgrad, men idet kompressorens trykluft anvendes til at flytte spildevandet i pumpeledningen vil den faktiske virkningsgrad sandsynligvis være lav. Mammutpumper har således normalt en virkningsgrad på cirka 5 til 20%, mens pumpen i Gerå til sammenligning har en virkningsgrad på omkring 35 % ved stationær drift. [22] Selvom kompressorens virkningsgrad forventes at være lavere end pumpens, er det specifikke energiforbrug ved luftindblæsningen imidlertid markant lavere end ved pumpningen, fordi udvidelsen af luften skaber en markant lavere ledningshastighed end under pumpningen.

Årsagen til pumpernes reducerede energiforbrug er, at den indblæste luft ekspanderer efter endt indblæsning og dermed fortrænger vand fra ledningen. At den indblæste luft fortrænger vandet i ledningen efter indblæsningen er stoppet understreges af en inspektion af oppumpningsbrønden, som ses på figur 6.5. Inden pumpen starter løber der ikke vand i oppumpningsbrønden, men når pumperne starter afstrømmer vandet i skulp, som fortsætter efter pumpen og indblæsningen stoppes. På figuren ses således et billede af oppumpningsbrønden ved lav og høj vandføring.



Figur 6.5. Observeret afstrømning i oppumpningsbrønden ved lav vandføring (tv) og høj vandføring (th).

På figur 6.6 ses en trykmåling med og uden luftindblæsning, som viser, at luftindblæsningen medfører en forøgelse af det statiske tryk med cirka 0,5 bar. Luftindblæsningen medfører desuden en halvering af driftstrykket, hvilket indikerer, at luftindblæsningen øger pumpens ydelse.



Figur 6.6. Trykmåling ved normal drift i pumpestationen den 17. marts 2015 (tv) og efter en periode på seks døgn uden luftindblæsning den 28. marts 2015 (th). Trykmåleren er placeret cirka 1,5 meter over pumpen, og målingerne er ikke korrigerede herfor.

Luften kan forøge ledningens modtryk markant, hvis den indblæste luft samler sig til store luftlommer i ledningens højdepunkter. På figur 6.7 ses en illustration af en pumpeledning med to luftlommer, hvor vandet ved pumpedrift strømmer under luftlommen. Ved luftlommen er energilinjen tilnærmelsesvist parallel med vandspejlet under luftlommen og tryktabet ved luftlommen er derfor erfaringsmæssigt lig den vertikale komposant af luftlommens størrelse. [27]



Figur 6.7. Forøgelsen af modtrykket i en pumpeledning som følge af luftlommer i højdepunkterne.

En mulig forklaring på forøgelsen af det statiske tryk og halveringen af modtrykket er, at de indblæste luftlommer bevæger sig i separate klumper gennem ledningen. Når luften transporteres i klumper gennem ledningen vil vandet principielt strømme i hele rørets tværsnitsareal, og i kraft af luftens tilstedeværelse vil friktionstabet derfor reduceres. At modtrykket tilnærmelsesvist halveres skyldes derfor, at der kun er vand i cirka halvdelen af ledningen, hvilket forklarer reduktionen i pumpernes energiforbrug med cirka 25%. Umiddelbart efter pumperne stopper vil en del af luftklumperne befinde sig på ledningsstrækningerne med nedadrettet hældning som illustreret på figur 6.8. Når luften befinder sig på nedadrettede ledningsstrækninger vil de reducere suget på opadrettede strækningerne og dermed øge det statiske tryk. At luften i ledningen i Gerå bevæger sig i klumper (en. slugs) understreges af en gennemgang af relevant litteratur om to-fasede strømninger i trykrør, som er beskrevet i bilag F.



Figur 6.8. Principskitse af luftens placering i klumper, når pumperne stopper.

6.2.3 Længdeprofilets betydning

Strømningsformen med separate klumper skyldes sandsynligvis kombinationen af lille rørdiameter og høj ledningshastighed, der sikrer, at luften transporteres med spildevandsstrømmen. Om natten betyder den reducerede tilstrømning, at pumperne starter relativt sjældent, og under de lange perioder med stilstand i ledningen vil luftlommerne potentielt kunne udvide sig eller samles i større luftlommer og dermed øge modtrykket. Trykmålingerne i pumpestationen viser imidlertid, at det ikke er tilfældet, idet trykmålingerne over en pumpecyklus om natten og dagen er identiske. Ledningens længdeprofil bidrager sandsynligvis til adskillelsen af luften og vandet om natten. Strømningerne i kloakledningen i Gerå har således en del paralleller til transportformen i vakuumsystemer, hvor vandet også transporteres i separate klumper. I vakuumsystemer anlægges horisontale ledningsstrækninger normalt med transportlommer, hvor ledningerne opstrøms har et fald på omkring 5 ‰ imod. I perioder med lavt vandforbrug eksempelvis om natten, samles vandet i transportlommerne, hvorfra det transporteres i klumper når vandforbruget igen stiger. [33] På figur 6.9 ses en illustration af et typisk længdeprofil for et vakuumsystem. Det er således sandsynligt, at højdepunkterne langs længdeprofilet i Gerå fungerer som transportlommer, der samler luftlommerne og dermed forhindrer driftsproblemer med luftindblæsningen om natten.



Figur 6.9. Principskitse af længdeprofil med transportlommer i vakuumsystemer.

6.3 Fuldskalaforsøg i Als

I et forsøg på at udvide erfaringsgrundlaget for metodens anvendelighed afprøves luftindblæsningen i et fuldskalaforsøg på en kloakpumpeledning fra Vestvejen i Als til Høgholt i Nordjylland. Pumpeledningen er ejet af Mariagerfjord Vand A/S og har siden etableringen i år 2013 været påvirket af svovlbrintedannelse. Oppumpningsbrønden blev ved konstruktionen belagt med en epoxybelægning for at forøge brøndens korrosionsbestandighed, men efter cirka 2 års drift er belægningen bortkorroderet, og der sker derfor en kraftig tærring af brøndens beton. Derudover modtager Mariagerfjord Vand A/S klager om lugtgener fra cyklister, som passerer oppumpningsbrønden på en cykelsti. Det har derfor høj prioritet at få bekæmpet svovlbrintedannelsen på ledningen, som har en længde på 6150 m og et længdeprofil som vist på figur 6.10. Drifts- og systemoplysninger er baseret på [34].



Figur 6.10. Længdeprofil for kloakpumpeledningen fra Als til Høgholt. Ledningen er udført i Ø220 mm og Ø250 mm PN10-rør. [34]

Indtil længdeprofilets højdepunkt i station $5300\,\mathrm{m}$ er ledningen udført i Ø220 mm, mens den resterende ledningsstrækning er udført i Ø250 mm. Årsagen til dimensionsændringen er, at ledningen oprindeligt er anlagt som trykgravitationsledning efter højdepunktet. Gravitationsledningen havde imidlertid ikke tilstrækkelig kapacitet under regn, hvor vandet stuvede op i oppumpningsbrønden, og ledningen er idag omlagt til én lang trykledning med automatiske udluftningsventiler ved højdepunktet. Trykledningen i Als adskiller sig på to væsentlige punkter fra ledningen i Gerå, idet ledningens længde og diameter er større, ligesom ledningen i Als har et markant højdepunkt, hvor luften kan samle sig i luftlommer. ABS-pumperne i pumpestationen starter cirka tre gange i timen, og der pumpes cirka 5 m^3 spildevand ved hver pumpning. I ledningen i Gerå sker luftindblæsningen med et luft/vandforhold på cirka 0,8. Ønskes samme forhold i Als-ledningen skal der derfor som udgangspunkt indblæses en luftmængde, der ved ledningens statiske tryk fylder 4 m^3 . Det svarer til en indblæsningsmængde på cirka 8 m³ atmosfærisk luft, idet det statiske tryk ifølge SRO-data er cirka 1 barg. Fuldskalaforsøget blev igangsat den 15. april 2015, hvor en 90 liters Reno FF 3 kW kompressor, som har et tanktryk på 10 barg, blev installeret. På figur 6.11 ses kompressoren, som er koblet på trykledningen. På samme figur ses desuden en regulator, som anvendes til styring af kompressorens afgangstryk. Efter tilkoblingen gik kompressoren i stykker, og den blev derfor

den 20. april 2015 udskiftet med en mindre kompressor, som indblæser 3.5 m^3 luft ved 2 barg mens pumpesumpen fyldes, hvilket svarer til 10.5 m^3 atmosfærisk luft.



Figur 6.11. Den installerede Reno FF 3 kW kompressor med et tankvolumen på 90 liter og den anvendte regulator til styring af afgangstrykket fra kompressoren. Kompressoren er efterfølgende på grund af havari erstattet af en mindre kompressor af ukendt type.

Pumperne yder under normal drift cirka $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, som i den største ledningsdimension svarer til en hastighed på 0.33 ms^{-1} . Den lave pumpeydelse skyldes, at pumperne under normal drift frekvensreguleres for at minimere energiforbruget. Pumperne er således udlagt til cirka $130 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Erfaringsmæssigt er luftfjernelseshastigheden givet ved følgende udtryk. [16]

$$V = 0.6\sqrt{gD} \tag{6.1}$$

Hvor:

V	Luftfjernelseshastigheden	$[LT^{-1}]$
g	Tyngdeaccelerationen	$[LT^{-2}]$
D	Rørets diameter	[L]

I ledningen nedstrøms for længdeprofilets højdepunkt svarer dette til en luftfjernelseshastighed på $0.90 \,\mathrm{ms^{-1}}$. For at fjerne luftlommerne fra højdepunktet skal de skubbes under Korup Å, som befinder sig i lavpunktet i station 6000 m. Vandets hastighed udgør den øvre grænse for luftens strømningshastighed, og det er derfor som minimum nødvendigt, at pumperne kører i 15 minutter, hvis luften skal kunne fjernes fra ledningen. Beregningerne viser, at luften sandsynligivs ikke kan fjernes fra højdepunktet, hvorfor udluftningsventilerne holdes åbne under fuldskalaforsøget. Det betyder, at hovedparten af den indblæste luft forlader spildevandsstrømmen i ledningens højdepunkt.

På figur 6.12 ses en tidsserie af målte svovlbrintekoncentrationer i pumpesumpen i Høgholt. Målingerne viser, at luftindblæsningen efter den 20. april 2015 har reduceret svovlbrintekoncentrationerne fra cirka 100 til 20 ppm. Ved en inspektion af pumpeledningen den 4. juni 2015 klokken 21:30 er det konstateret, at der udefra hverken lugter af svovlbrinte ved udluftningseller oppumpningsbrønden. At der ikke lugter af svovlbrinte ved udluftningsbrønden viser, at den målte reduktion i oppumpningsbrønden skyldes luftindblæsningens forhindring af iltfrie forhold. Havde der lugtet af svovlbrinte ved udluftningsbrønden ville det således indikere, at luftindblæsningen blot havde flyttet svovlbrinteproblemerne opstrøms til udluftningsbrønden. I et forsøg på at reducere svovlbrintekoncentrationerne yderligere er det den 4. maj 2015 besluttet at fordoble antallet af pumpestarter. Idet der indblæses cirka 10,5 m³ atmosfærisk luft for hver 5 m^3 spildevand er der et beluftningspotentiale på cirka $630 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$. På grund af iltningspotentialets størrelse vurderes det således at være mest hensigtsmæssigt at forsøge at øge effektiviten af beluftningen fremfor at øge indblæsningsmængden. En fordobling af antallet af pumpestarter forventes netop at øge kontakten mellem luft og spildevand og dermed effektiviteten af beluftningen. På svovlbrintemålingerne ses, at fordoblingen af antallet af pumpestarter ikke har påvirket svovlbrintekoncentrationen i oppumpningsbrønden.



Figur 6.12. Manuelt digitaliseret måling af svovlbrinte i luften over oppumpningsbrønden fra pumpesystemets SRO-anlæg.

Oppumpningsbrønden modtager dagligt cirka 400 m³ spildevand fra pumpestationen i Als, ligesom der er tilløb fra en pumpeledning fra Skelund, som aflaster cirka 200 m³ dagligt. Også på ledningen fra Skelund udvikles der svovlbrinte, som kan påvirke målingerne i oppumpningsbrønden og dermed forklare, hvorfor det ikke er muligt at reducere svovlbrintekoncentrationerne yderligere. For at undersøge om dette er tilfælde er det planlagt at tilsætte flydende jernsulfat i pumpestationen i Skelund i en kort periode. Ved projektafleveringen er dette forsøg ikke blevet igangsat, og resultatet fra dette forsøg kan derfor ikke inddrages i projektet.

I pumpesystemets SRO-anlæg måles tryk og vandføring, som dog på grund af opsætningen i SRO-systemet ikke har været muligt at udtrække. Målingerne viser imidlertid, at luften har medført en forøgelse af modtrykket på cirka 0,7 bar og dermed nedsat pumpens ydelse. Efter luftindblæsning yder pumpen således cirka $15 \, \text{ls}^{-1}$ ved et modtryk på $21 \, \text{mVs}$, mens den forinden ydede cirka $21 \, \text{ls}^{-1}$ ved et modtryk på $16 \, \text{mVs}$. Idet ABS-pumpernes karakteristik er

ukendt er det ikke muligt at omregne disse driftspunkter til specifikke energiforbrug for på den måde at vurdere meromkostningen ved etableringen af luftindblæsningen. Hvis det som overslagsberegning forudsættes, at pumperne ved begge driftspunkter har en virkningsgrad på 60 % estimeres pumperne efter luftindblæsningen at optage 5,5 kW, mens de forinden optog 3,9 kW. Ifølge overslagsberegningen betyder det således, at luftindblæsningen har fordoblet det specifikke energiforbrug fra 0,05 til 0,1 kWh m⁻³. Forudsættes en elpris på 0,82 kr kWh⁻¹ uden fradragsberettigede elafgifter og moms svarer det øgede strømforbrug ifølge beregningen til en omkostning til svovlbrintebekæmpelse på cirka 0,05 kr m⁻³. Til sammenligning koster det som nævnt ovenfor erfaringsmæssigt i størrelsesordenen 0,5 til 1 kr m⁻³ at bekæmpe svovlbrinte ved kemikaliedosering. Selvom overslagsberegningen af det øgede energiforbrug er behæftet med en del usikkerhed, primært fordi pumpens virkningsgrad er ukendt, er det således rimeligt at konkludere, at luftindblæsning har bekæmpet svovlbrinte til en pris svarende til cirka 10 % af den typiske udgift ved kemikalietilsætning.

6.4 Nuværende erfaringer

Baseret på de nuværende erfaringer tyder det på, at ledninger med følgende karakteristika er mest hensigtsmæssige til luftindblæsning.

- Lille ledningsdiameter
- Høj strømningshastighed
- Stigende længdeprofil med flere mindre højdepunkter undervejs

Ledningens længdeprofil har stor betydning for muligheden for at transportere luftlommerne gennem pumpeledningen. På ledninger med markante højdepunkter kan luften fra flere indblæsninger samle sig i store luftlommer, som forøger modtrykket og dermed reducerer pumpernes kapacitet. I nogle tilfælde kan modtrykket sågar overstige pumpernes maksimale løftehøjde, hvorfor pumperne ikke kan flytte vandet i ledningen, og når forsyningsselskaberne beretter om driftsproblemer med luftindblæsningen er det sandsynligvis denne effekt der refereres til.

Normalt beregnes luftfjernelseshastigheden ved hjælp af ligning (6.1). Det empiriske udtryk indikerer, at en stor ledningsdimension kræver en tilsvarende stor strømningshastighed af vandet, hvis luften skal kunne transporteres mod oppumpningsbrønden. I Gerå er luftfjernelseshastigheden eksempelvis cirka 0.6 ms^{-1} , og da der ved stationær ydelse af pumpen er en ledningshastighed på omkring 1.1 ms^{-1} vil luftlommerne blive transporteret gennem systemet. Dette understreges af trykmålingerne i overgangsperioderne, hvor luftindblæsningen stoppes, som viser at luften fjernes fra ledningen i løbet af cirka et døgn. Idet ledninger normalt er designet efter ledningshastigheder på mellem $0.8 \text{ og } 1 \text{ ms}^{-1}$ kunne kravet til luftfjernelse indikere, at ledningsdimensioner på op til Ø500mm er velegnede til luftindblæsning, hvilket ikke stemmer overens med erfaringerne fra forsyningsselskaberne i Jylland.

Hvis vandet og luften skal strømme i klumper stilles desuden krav til kompressorens ydelse. Baseret på erfaringerne i Gerå skal indblæsningen ske med et luft/vand-forhold på cirka én, hvis transporten skal foregå i klumper. På store ledninger kan det være vanskeligt at opnå en tilstrækkelig høj indblæsningsmængde, specielt i situationer hvor kompressoren ikke er valgt til den specifikke ledning, men flyttes mellem forsyningsområdets pumpestationer. Erfaringerne fra Gerå tyder desuden på, at det ikke er muligt at dimensionere luftindblæsningen efter støikometriske beregninger af behovet for oxygentilførsel, idet der kræves langt større luftmængder for at sikre at luften og vandet strømmer i klumper. Den store indblæsningsmængde betyder, at en øget mængde letomsætteligt organisk stof omsættes i kloakpumpeledningen, hvilket kan påvirke fjernelsen af nitrogen og fosfor på renseanlæggene. Kravet til ledningsdimension og strømningshastighed betyder imidlertid, at luftindblæsningen sandsynligvis kun kan implementeres på de mindre afskærende pumpeledninger, som volumenmæssigt ofte betyder mindre for renseanlæggets samlede tilførsel af organisk stof.

Analysen af Gerå-ledningen indikerer, at et stigende længdeprofil med mindre højdepunkter fordelt over ledningslængden kan virke gunstige i forhold til systemets drift om natten. Om natten virker højdepunkterne som samlingsstationer for luftlommerne, og det sikres derved, at luften og vandet adskilles i klumper, således der ikke dannes store luftlommer, der øger modtrykket.

6.5 Udvikling af metoden

Svovlbrintedannelse er allerede et stort problem for forsyningsvirksomhederne, og den nuværende udvikling indenfor kloakområdet tyder på, at problemerne blot vil blive større i fremtiden. I langt de fleste forsyningsområder separeres kloaksystemet, ligesom mængden af uvedkommende vand reduceres ved sanering og tætning. Endeligt er vandforbruget faldende, hvilket samlet set betyder, at spildevandet i pumpeledningerne vil blive mere koncentreret og samtidig opleve en øget opholdstid med øget svovlbrintedannelse som konsekvens. Med den nylige debat om tilladelse til anvendelse af affaldskværne i Danmark er der sågar yderligere risiko for opkoncentrering af organisk stof i spildevandet. Erfaringerne fra Gerå og Als viser, at luftindblæsning på effektiv vis kan fjerne svovlbrintedannelse, men at det i nogle tilfælde kan være en uhensigtsmæssig løsning, fordi luften samler sig i store luftlommer og dermed nedsætter pumpeydelsen. Der er stadigvæk behov for flere forsøg med luftindblæsning for at bestemme, hvornår det kan betragtes som et effektivt værktøj til svovlbrintebekæmpelse. Specielt ville et værktøj til beregning af luftens påvirkning af pumpeydelsen være af stor værdi ved implementeringen af metoden. I bilag F diskuteres forskellige muligheder for at modellere luftens strømning i pumpeledninger, herunder anvendelse af CFD-simuleringer.

En mulig løsning i situationer hvor luften samler sig i højdepunkter og nedsætter pumpeydelsen kan være at erstatte cirkulationspumperne med fortrængningspumper, der yder tilnærmelsesvist konstant vandføring uafhængigt af modtrykket. Fordelen ved at anvende sådanne pumper er, at det er muligt at transportere en konstant vandmængde, selvom luftlommerne forøger strømningsmodstanden betydeligt. Ulempen ved fortrængningspumperne er dog risikoen for at ødelægge kloakledningen, fordi der i teorien ikke er en øvre grænse for pumpernes løftehøjde. I mange ældre PN6-rør og i ældre kloakrør af ukendt tilstand kan dette være en risikabel fremgangsmåde. Et andet interessant perspektiv ved metoden er muligheden for at tømme ledningen delvist ved luftindblæsning. På ledninger med stor variation i tilstrømningen, herunder eksempelvis tryksatte kloakledninger i sommerhusområder, kunne der trykkes så meget luft ind i ledningen som muligt og dermed fortrænge en stor del af ledningens vandindhold. På samme måde kunne kloakpumpeledninger med lav tilstrømning om natten blive tømt delvist.

Key Points

Muligheden for at anvende luftindblæsning til svovlbrintebekæmpelse kan summeres i følgende key points.

- Ved indblæsning af trykluft i pumpeledninger er det muligt at fjerne svolvbrintedannelse.
- Indblæsningen kan med fordel ske efter endt pumpning, fordi kompressoren her oplever et mindre modtryk end når pumperne kører.
- Luften reducerer vandets iltfrie opholdstid, idet luften fortrænger vand fra ledningen og belufter spildevandet. I en pumpestation i Gerå, Nordjylland har luftindblæsning halveret opholdstiden i en afskærende pumpeledning og fjernet svolvbrintedannelse i ledningen.
- Erfaringerne fra pumpeledningen i Gerå indikerer, at luftindblæsningen skal dimensioneres, således strømningen i ledningen er domineret af klumper af luft og vand. Det betyder, at det indblæste volumen skal være markant større end hvad der kan beregnes nødvendigt ved betragtning af iltbalancer for spildevandet i ledningen.
- Erfaringerne fra Gerå er blevet anvendt til et fuldskalaforsøg med luftindblæsning i Als, Nordjylland. Her har luftindblæsningen i første omgang reduceret svovlbrintekoncentrationerne i oppumpningsbrønden fra 100 til 20 ppm. De resterende 20 ppm vurderes at stamme fra et tilløb i oppumpningsbrønden fra en anden ledning.
- Luftindblæsningen har fordoblet pumpernes energiforbrug, hvilket svarer til en omkostning til svovlbrintebekæmpelse på cirka $0,05 \text{ kr m}^{-3}$. Til sammenligning tyder erfaringer på, at kemikalietilsætning vil koste cirka $0,5 \text{ kr m}^{-3}$ alene i indkøb af kemikalier.
- Luftindblæsning er fortrinsvist egnet i jævnt stigende ledninger med flere mindre pukler i længdeprofilet, som fungerer som samlestationer for luftlommer om natten, hvor tilstrømningen til pumpestationen er reduceret. Derudover viser erfaringer, at luftindblæsningen primært er hensigtsmæssig i små ledningsdimensioner med høj strømningshastighed.
- Computersimuleringer har potentiale for at forbedre kendskabet til metodens anvendelsesområder og understøtte designet af luftindblæsning på eksisterende og nye pumpeledninger.

7. Optimering af pumpesumpes selvrensningsevne

Ved design af pumpesumpe udgør selvrensningskrav typisk den øvre grænse for pumpesumpes størrelse, idet en meget stor pumpesump vil give anledning til lave strømningshastigheder og dermed utilstrækkelig selvrensning. Det aflejrede sediment kan medføre lugtgener og må derfor fjernes ved manuel eller automatisk spulning. I dette kapitel undersøges muligheden for at anvende CFD-simuleringer til at analysere og optimere selvrensningsevnen af pumpesumpe.

7.1 Fremgangsmåde

Grundlæggende er pumpesumpes selvrensningsevne et udtryk for hvorvidt sedimentfraktionerne i indløbsvandføringen aflejres permanent i pumpesumpen, eller om kræfterne i den strømmende væske kan transportere partiklerne gennem pumpen. Idéelt set bør analysen af selvrensningsevnen således baseres på en matematisk beskrivelse af transporten af hver enkelt partikelfraktion i indløbsvandføringen. Der foreligger sjældent partikelstørrelsesfordelinger for råspildevand, men typisk er der cirka 300 gram suspenderet stof per kubikmeter vand i moderat fortyndet husspildevand. [32] Heraf er cirka 70% organisk materiale, mens den resterende del er uorganisk. I fælleskloakerede områder vil pumpesumpen under regn desuden modtage sediment fra befæstede overflader, som er opbygget under tørvejr. Det betyder med andre ord, at en pumpesump må forventes at modtage forholdsvist store mængder sediment med både kohæssive og ikke-kohæsive karakteristika.

En sedimenttransportmodel skal kunne beskrive alle styrende mekanismer for sedimenttransport, herunder sedimentation, flokkulering, konsolidering, kompaktering, resuspension og bundtransport. Sådanne sedimenttransportmodeller er implementeret med succes i kystområder til beskrivelse af transport af både kohæssivt og ikke-kohæsivt sediment. Der er eksempelvis modelleret sedimentransport i Grådyb ved Esbjerg, hvor tidevandet bevirker en regelmæssig fjernelse af aflejrede kohæssive sedimenter ved høj- og lavvande. [35] En lignende beskrivelse af transporten af sediment i spildevand har vist sig at være mere kompliceret, fordi sedimentets opholdstid er af en sådan størrelsesorden, at kompaktering og konsolidering har stor betydning for sedimentets erosionsmodstand, som typisk varierer i sedimentlagets dybde. [36] Selv hvis det var muligt at beskrive alle de ovenstående processers påvirkning på sedimenttransporten, ville denne fremgangsmåde sandsynligvis ikke være operationel til analyse af pumpesumpes selvrensningsevne, fordi metoden vil kræve et omfattende datagrundlag til kalibrering og validering af modelresultaterne. Den hyppigst anvendte fremgangsmåde til vurdering af selvrensningsevnen i spildevandssystemer er derfor at beregne bundforskydningsspændingerne og sammenligne disse med en kritisk bundforskydningsspænding, der erfaringsmæssigt giver tilfredsstillende selvrensning. Eksempelvis anvendes ofte en kritisk værdi på 1,5 Pa i separate spildevandssystemer i Danmark, mens der i fællessystemer normalt stilles krav på 3 til 4 Pa. [22]

Beregningen af bundforskydningsspændingerne i en pumpesump ved hjælp af CFD-software kan generelt ske ved følgende fremgangsmåder.

- Et-faset simularing med fastholdt vandstand.
- To-faset simularing med tidsvarierende vandstand.
- Et-faset simularing med tidsvarierende vandstand.

I den førstnævnte metode betragtes pumpesumpens stopniveau som en friktionsløs væg, hvorved vandstanden i pumpesumpen bliver konstant. Denne forsimpling medfører en markant reduktion i beregningstid, idet det kun er nødvendigt at løse bevarelsesligningerne i vandfasen. I langt de fleste tilfælde vil bølger i pumpesumpen ikke give anledning til nævneværdige bidrag til bundforskydningsspændingerne, hvorfor denne forsimpling kan være acceptabel.

Alternativet hertil er den to-fasede beregning, hvor også luftfasen inddrages i simuleringerne. Til at beskrive strømningerne i de to faser anvendes en Volume of Fluid, VOF-model. I denne model skalleres materialekonstanterne i bevarelsesligningerne med en volumenfraktion af henholdsvis luft og vand i hver beregningscelle. Der tages ikke højde for overfladespændinger, men da faseovergangen mellem luft og vand i pumpesumpen normalt er veldefineret, og da der samtidig ikke ønskes en beskrivelse af bobler i vandet, er denne forsimpling acceptabel. [37] Inkluderingen af luftfasen gør metoden mere beregningstung, fordi modelområdet også skal indeholde luften over vandspejlet, ligesom der kræves en fin stedslig diskretisering omkring vandspejlet. Modellen har imidlertid den fordel, at det er muligt at beskrive pumpesumpens vandstandsvariation over en pumpecyklus, hvorved en mere nøjagtig beskrivelse af den tidslige opbygning af bundforskydningsspændingerne kan opnås.

I DHIs Mike-programmer til simulering af strømninger er der implementeret en beregningsmetode, der muliggør en et-faset simulering med varierende og frit vandspejl uden behov for at beskrive luftfasens strømninger. I denne metode indføres aktive og inaktive celler, hvor bevarelsesligningerne kun løses i de aktive celler. Hvis vandstanden stiger aktiveres inaktive celler, ligesom celler deaktiveres, når vandstanden falder. [38] Ved denne beregningsmetode kræves fortsat en fin diskretisering omkring vandspejlet, men i forhold til VOF-modellen reduceres beregningstiden, fordi luften ikke skal beskrives ved bevarelsesligninger. Denne metode bør derfor være velegnet til simulering af bundforskydningsspændinger i pumpesumpe, men den nuværende implementering i Mike-programmerne er uegnet til simuleringer i små geometrier som eksempelvis pumpesumpe, idet de implementerede meshere og turbulensmodeller er valgt med henblik på at fungere optimalt i naturlige systemer som eksempelvis fjorde.

7.2 Nuværende design

Anvendeligheden af CFD-simuleringer til analyse og optimering af pumpesumpes selvrensningsevne undersøges med udgangspunkt i to forskellige pumpesumpe. Den ene pumpesump er placeret ved pumpestationen på Syrenvej i Kongerslev. Udformningen af pumpesumpen er skitseret på figur 7.1. Pumpesumpen er konstrueret i en præfabrikeret Ø2400 mm glasfiberbrønd og installeret med to separate sugeledninger, som begge er udført i Ø106 mm rustfrit stål. Pumpesumpen har bundkote i +12,26 m, dækkote i +18,16 m og sugeledningen er placeret 8 cm over pumpesumpens bund. Stopniveauet for pumperne er estimeret til kote +14,04 m, hvilket betyder, at pumpesumpen har en permanent vanddybde på 1,75 m svarende til et permanent volumen på cirka 7 m³ i pumpesumpen.



Figur 7.1. Snittegning af pumpesumpen på Syrenvej i Kongerslev. Alle mål er i millimeter og tegningen er ikke målfast, ligesom stopniveau er estimeret. [39].

Foran indløbet til pumpesumpen er der placeret en prelplade, der skal forhindre transport af luftbobler fra indløbet til sugledningen. I pumpesumpen er der desuden etableret et nødoverløb i kote +15,05 m. Pumpesumpen har derfor et relativt stort magasineringsvolumen på knap 13 m^3 . Dette skyldes, at pumpesumpen er dimensioneret før kloaksystemet i Kongerslev blev separeret, hvor regnvejrsafstrømningen krævede et større magasineringsvolumen. Derudover er kloaksystemet placeret forholdsvist dybt ved Syrenvej, hvilket nødvendiggør en dyb pumpesump for at forhindre opstuvninger opstrøms i systemet.

For at forbedre pumpesumpens selvrensningsevne er der etableret et skyllesystem, som er koblet direkte på pumpesystemets trykside. Skyllesystemet bruges ikke under normal drift, men kan bruges til spulning af pumpesumpen ved behov. Placeringen af skyllesystemet er illustreret på figur 7.1. Etableringen af et syllesystem er normal praksis i pumpesumpe, der har oplevet reduceret tilstrømning som følge af separatkloakering. [22]

Den anden pumpesump er et eksempel fra litteraturen præsenteret i [40], som i den resterende del af projektrapporten refereres til ved navnet Ijrras. Udformningen af denne pumpesump er skitseret på figur 7.2. Som illustreret på figuren har pumpesumpen tre separate sugeledninger og ved designet af pumpesumpen er selvrensningsevnen søgt optimeret ved at minimere vanddybden for at øge strømningshastighederne i pumpesumpen. Omkostningen herved er et øget arealbehov til pumpesumpen. Derudover er der ved udfomningen taget hensyn til, at alle tre sugeledninger skal have tilstrækkelig tilførsel af vand uden risiko for luftindtrængen.



Figur 7.2. Snittegning af Ijrras-pumpesumpen fra litteraturen [40]. Alle mål er i milimeter og tegningen er ikke målfast.

7.3 Analyse af nuværende selvrensningsevne

Analysen af den nuværende selvrensningsevne i pumpesumpene sker på baggrund af en computersimulering af de stationære bundforskydningsspændinger beregnet ved konstant ydelse af én pumpe. I virkeligheden burde alle mulige kombinationer inddrages i simuleringerne, men af hensyn til projektets tidsmæssige rammer undlades dette. Opsætningen af CFD-modellerne, herunder valg af fysiske modeller, randbetingelser, løsningsmetode, diskretisering samt konvergenskriterier er beskrevet i detaljer i bilag G. På figur 7.3 ses de modellerede bundforskydningsspændinger i Ijrras-pumpesumpen. Der foreligger ikke viden om pumpeydelsen i Ijrras, så pumpen forudsættes at yde $41,5 \, \text{ls}^{-1}$ svarende til en hastighed i sugeledningen på $1 \, \text{ms}^{-1}$. I praksis vil pumpeydelsen sandsynligvis være større end denne, da det er normal praksis at nærme sig grænsen for kavitation ved pumpevalg.



Figur 7.3. Beregnede bundforskydningsspændinger i Ijrras-pumpe
sumpen ved en stationær ydelse på $41,5\,{\rm ls^{-1}}$ af den nederste pumpe.

Pumpesumpen lever ikke tilnærmelsesvist lever op til det gængse selvrensningskrav fra spildevandssystemer på 1,5 Pa. Ved indløbet til pumpesumpen er der på grund af det smalle tværsnit en forholdsvist høj hastighed, hvorfor der her en bundforskydningsspænding på omkring 0,1 Pa. I takt med at tværsnittet udvides, reduceres strømningshastigheden og dermed også bundforskydningsspændingen, som her er cirka 0,05 Pa. Ved tilledningen til sugeledningen accelereres vandet igen, og her stiger bundforskydningsspændingerne til cirka 0,15 Pa. I tilløbet til de inaktive sugeledninger er bundforskydningsspændingerne ubetydelige, men idet pumperne alternerer, vil disse områder også opleve bundforskydningsspændinger af samme størrelsesorden.

Nedstrøms for sugeledningens indtag er der et område med lav strømningshastighed og dermed lave bundforskydningsspændinger. På figur 7.4 ses vandets fart i et vertikalt snit skråt gennem indløbets og sugeledningens centerlinje. Strømningerne nedstrøms for sugeledningens indløb er påvirket af de omkringliggende vægge og vandet i dette område vil cirkulere i en hvirvel, som drives af forskydningsspændingerne fra de omkringliggende strømninger. I dette område vil der sandsynligvis udvikle sig permanente sedimentaflejringer.



Figur 7.4. Beregnede hastighedsfordeling i et snit på langs af Ijrras-pumpe
sumpen ved en stationær ydelse på $41,5\,{\rm ls^{-1}}$ af den nederste pumpe.

Pumperne i Kongerslev yder ved normal drift cirka $20 \, \rm ls^{-1}$ svarende til en middelhastighed på cirka $2,25 \, \rm ms^{-1}$ i sugeledningen. På figur 7.5 ses de beregnede bundforskydningsspændinger ved stationær drift af den ene pumpe. Heller ikke pumpesumpen i Kongerslev lever op til de gængse selvrensningskrav for afløbssystemer på 1,5 Pa. I området omkring indtaget til sugeledningen er der bundforskydningsspændinger på op mod 0,3 Pa, mens der i størstedelen af pumpesumpen er ubetydelige bundforskydningsspændinger. Dette er en direkte konsekvens af det forholdsvist store permanente volumen i pumpesumpen, der giver anledning til lave strømningshastigheder i pumpesumpen. På figur 7.5 ses de modellerede strømningshastigheder i et lodret snit gennem pumpesumpen. Det ses, at der generelt er lave strømningshastigheder i pumpesumpen pånær området omkring sugeledningens indtag, hvor vandet accelereres. På pumpesumpens banketter vil aflejret sediment sandsynligvis blive transporteret nedad på grund af gravitationen, indtil det rammer den vandrette bund. Der må derfor forventes at være permanente sedimentaflejringer langs bunden af banketten.



Figur 7.5. Bundforskydningsspændinger og beregnede hastigheder i et lodret snit gennem pumpesumpen i Kongerslev ved stationær ydelse på $20 \, \text{ls}^{-1}$ af én pumpe.

7.4 Optimering af selvrensningsevne

At begge pumpesumpe ikke lever op til selvrensningskravet på 1,5 Pa betyder, at der i praksis må blive aflejret sand og grus i pumpesumpen. Umiddelbart virker dette utilfredsstillende, men inden en pumpesumps design ændres for at optimere selvrensningsevnen, er der imidlertid en række forhold, der skal overvejes. Optimeringen kan således potentielt medføre en række mere alvorlige problemer med drift af pumpesystemet. Nedenfor er listet en række eksempler på problemstillinger relateret til optimeringen af selvrensningsevnen.

- Strømningshastighederne i pumpesumpen kan øges ved en reduktion af stopniveauet i pumpesumpen. Den reducerede dykning af sugeledningens indløb øger risikoen for luftindtrængen i pumpen. Luften kan give driftsproblemer på ledningen, ligesom luften nedsætter pumpens ydeevne markant, hvilket er illustreret på figur 7.6.
- Sand og grus kan i mange tilfælde medføre en forøgelse af slitagen af pumpen og dermed en forkortelse af levetiden af flere pumpedele. Udgiften til den hyppigere udskiftning af pumpedele kan således overstige udgiften til regelmæssig skylning af pumpesumpen.
- Det bør sikres, at sedimentet kan transporteres gennem pumpeledningen, således det ikke giver anledning til permanente sedimentaflejringer i pumpeledningen. Det er således markant lettere at fjerne sedimentaflejringer i pumpesumpen sammenlignet med pumpeledningen. Sedimenaflejringerne kan øge strømningsmodstanden i ledningen og dermed øge pumpernes energiforbrug, ligesom sedimenaflejringerne kan give anledning til øget svovlbrintedannelse.
- I systemer, hvor pumpesystemet er en del af et større netværk af transportledninger, skal hele netværkets selvrensningsevne betragtes i sammenhæng. Hvis en optimering af selvrensningsevnen på en pumpestrækning blot flytter problemerne til næste pumpestrækning er det således tvivlsomt, om forbedringen er rentabel. Hvis det er urealistisk at transportere sedimentet til renseanlægget kan systemet eventuelt designes således sedimentet primært aflejres i én bestemt pumpesump, således den regelmæssige rensning kan koncentreres om denne pumpesump.



Figur 7.6. Ændring i pumpekarkateristik ved luftindtrængning. [2]

Ovenstående forhold indikerer, at det ikke altid er hensigtsmæssigt at designe en pumpesump efter et selvrensningskrav på 1,5 Pa. Det er således primært vigtigt at sikre, at de finkornede organiske partikler bliver transporteret gennem pumpesumpen, da det er disse sedimentfraktioner, der vil give anledning til lugtproblemer.

Som nævnt ovenfor er der i Ijrras-pumpesumpen et område nedstrøms for indtaget til sugeledningen, hvor strømningshastighederne er lave, og der vil derfor sandsynligvis aflejres sediment i dette område. I dette område vil det være hensigtsmæssigt at etablere en banket med en hældning på 45°, som illustret på figur 7.7. På grund af bankettens hældning vil aflejret sediment blive transporteret til området under sugeledningen, hvorfra det transporteres gennem pumpen.



Figur 7.7. Foreslag til etablering af banket nedstrøms for indløbet til sugeledningen i Ijrraspumpesumpen.

I pumpesumpen i Kongerslev er det nærliggende at mindske det permanente vandvolumen, men som nævnt kan dette give problemer med utilstrækkelig dykning af sugeledningen. En mulighed for at optimere selvrensingsevnen er at ændre skyllesystemets placering, således det i højere grad kan sætte pumpesumpens vandvolumen i rotation. I simuleringen af strømningerne i pumpesumpen opstår der med det nuværende design ikke en cirkulerende strømning i pumpesumpen, fordi pumpesumpens geometri i er symmetrisk. For at en cirkulation kan opstå kræves en form for forstyrrelse, der kan tilføre vandvoluminet roterende kinetisk energi. Skyllesystemer kan eksempelvis sætte pumpesumpens volumen i rotation, hvis skylleprogrammet er tilstrækkeligt langt, idet større rotationer på grund af vandmassens inerti tager tid at opbygge. Ifølge tegningsmaterialet for pumpesumpen er skyllesystemets udløb på nuværende tidspunkt orienteret radialt i pumpesumpen med en hældning på 45°, så den flugter med banketten i periferien af pumpesumpens bund. Denne placering er ikke optimal i forhold til at skabe rotation i pumpesumpen, hvilket skyldes, at den på nuværende tidspunkt har til formål at spule bunden. Når Flygt installerer spulepumper langs kanten af et sparebassin placeres afgangen fra ejektoren typisk i en vinkel på 30° i forhold til radialretningen, idet denne placering erfaringsmæssig giver en optimal produktion af roterende kinetisk energi i det permanente vandvolumen. [23] Overføres disse erfaringer til pumpesystemet i Kongerslev kan skyllesystemets afgang placeres som illustreret på figur 7.8.



Figur 7.8. Foreslag til ændring af skyllesystemets placering i pumpesumpen i Kongerslev.

For at undersøge om den ændrede placering af skyllesystemet kan sætte pumpesumpens vandvolumen i rotation simuleres strømningerne under en skylning. Hastigheden ved udløbet af skyllesystemet forudsættes at være 2 ms^{-1} , selvom hastigheden i praksis skal beregnes ud fra systemets driftspunktet ved fastlægning af ledningskarakteristikken for skyllesystemets ledninger og trykforskellen mellem pumpeledningen og pumpesumpen. I modsætning til de tidligere simuleringer betragtes pumpesumpens stopniveau som en fastholdt trykrand, for på den måde at efterligne strømningerne under skylningen, hvor vandspejlet stiger. Hvis stopniveauet fortsat blev beskrevet som en friktionsløs væg ville det tilførte vand således løbe ud gennem sugeledningen og dermed give et misvisende strømningsmønster.

På figur 7.9 ses de beregnede bundforskydningsspændinger og hastighedsfordelingen i et vandret snit gennem skyllesystemets udløb 55 cm over pumpesumpens bund efter ét minuts skylning. Simuleringen viser, at skylleprogrammet har potentiale for at forøge bundforskydningsspændingerne langs overgangen fra banketten til den vandrette bund. På grund af vandmassens inerti tager det imidlertid lang tid at sætte hele pumpesumpens volumen i rotation, og i praksis ikke er det derfor ikke realistisk at skabe rotationen mellem to pumpninger.


Figur 7.9. Beregnede hastigheder i et vandret snit gennem pumpe
sumpen (tv) og bundforskydningsspændinger (th) efter skylning i ét minut.

Key Points

Optimeringen af pumpesumpes selvrensningsevne ved hjælp af computersimuleringer kan summeres i følgende key points.

- Den øvre grænse for pumpesumpens volumen bestemmes oftest af selvrensningsevnen, idet meget store voluminer giver anledning til aflejringer af sediment i pumpesumpen.
- Aflejret sediment i pumpesumpen kan give anledning til lugtgener omkring pumpestationen.
- Kommercielle computerprogrammer som eksempelvis STAR CCM+ kan anvendes til analyse og optimering af selvrensningsevnen af pumpesumpe, men deres anvendelighed kan øges betydeligt, hvis en ny beregningsmetode implementeres.
- Simulering af selvrensningsevnen i to forskellige pumpesumpe viser, at begge pumpesumpe ikke lever op til gængse selvrensningskrav fra spildevandssystemer. Begge pumpesumpe er således ikke i stand til at transportere sand og grus væk fra pumpesumpen, som vil aflejres deri.
- Inden selvrensningsevnen af en pumpesump optimeres bør det overvejes, om optimeringen medfører alvorligere driftsproblemer. Eksempelvis kan sand og grus øge slitagen af pumpen, ligesom det kan aflejres i pumpeledningen, hvis selvrensningseven i pumpeledningen er utilstrækkelig.

8. Erfaringer og fremtidsperspektiver

Gennem dette projekt er mulighederne for optimere driften af kloakpumpesystemer blevet undersøgt. I dette kapitel summeres erfaringerne fra de undersøgte tiltag hertil, ligesom der præsenteres en række fremtidsperspektiver relateret til driftsoptimering. Kapitlet indeholder med andre ord en sammenfatning af hele projektets indhold.

8.1 Energioptimering

En analyse af den nuværende driftsstrategi af to typiske kloakpumpeledninger viser, at der på flade ledninger er potentiale for store energibesparelser, hvis ledningshastigheden nedsættes. I pumpesystemet i Tvis er der eksempelvis mulighed for at spare op mod 60 %, hvis ledningshastigheden nedsættes fra 0,8 til $0.5 \,\mathrm{ms}^{-1}$. På ledninger, hvor den geometriske løftehøjde udgør en væsentlig del af modtrykket, er der ikke samme besparelsespotentiale, fordi friktionstabet kun udgør en mindre del af modtrykket. I pumpesystemet i Kongerslev er der eksempelvis ikke nævneværdigt potentiale for energioptimering ved reducering af hastigheden, fordi pumpedriften derved bevæger sig væk fra den optimale virkningsgrad uden en betydelig reduktion af modtrykket. På trods af potentialet for energibesparelser på flade pumpeledninger er det normal praksis at projektere pumpeledninger efter en ledningshastighed på minimum $0.8 \,\mathrm{ms}^{-1}$. Udfordringen ved at reducere ledningshastigheden under dette niveau er, at der erfaringsmæssigt kan opstå problemer med selvrensning i pumpeledningen. Hvis reduktionen i ledningshastighed giver anledning til en forøgelse af biofilm og sedimentaflejringer vil det således udhule potentialet for energibesparelser og potentielt skabe andre driftsproblemer, så som øget svovlbrintedannelse.

I projektet er det vist, at trykmålinger kan omsættes til viden om både pumpens og ledningens tilstand, herunder udviklingen af ledningens ruhed. Med et detaljeret og dynamisk kendskab til ledningens tilstand er det således potentielt muligt at reducere ledningens hastighed under normal drift, og skylle ledningen ren i enkelte pumpninger, når trykmålingerne viser en forøgelse af ledningens ruhed. I en kloakpumpeledning i forsyningsområdet for Rebild Spildevand A/S praktiseres på grund af fejldimensionerede pumper en driftsstrategi, der minder om denne. En analyse af effekten af den hydrauliske rensning af denne ledning indikerer imidlertid, at pumpesumpen er for lille til at ledningen på effektiv vis kan blive skyllet ren. Under normal drift har det bundfældede sediment således opbygget en øget friktionsstyrke, som kræver en længerevarende rensning (eksempelvis 30 minutter) at fjerne. Erfaringerne med den hydrauliske rensning tyder derfor på, at det med den nuværende praksis for projektering af pumpesystemer ikke er muligt at implementere en reduceret ledningshastighed med behovsstyret skylning, fordi pumpesumpene normalt er for lille. Det er ikke realistisk at forøge renseprogrammets varighed ved tilsætning af vand fra forsyningsnettet eller fra vandløb og søer, og derfor kræves en ændret praksis for dimensionering af pumpesumpe. Hvis pumpesumpene i fremtiden anlægges som sparebassiner vil det således være muligt at tilbageholde nok vand til på effektiv vis at kunne skylle ledningen. På grund af sparebassinernes volumen vil det desuden være muligt at planlægge pumpningerne efter variationen af elpriserne, således der primært pumpes om natten, hvor

elpriserne er lavest. For at renholde bassinerne bør der installeres spulepumper, som eventuelt også kan indblæse luft. På den måde vil sparebassinet omdannes til et mindre renseanlæg, hvor letnedbrydeligt organisk stof omsættes. Det vil påvirke renseanlæggets processer, hvor det letnedbrydeligt stof anvendes til fjernelse af kvælstof og fosfor, men det vil samtidig løse de hyppige problemer med svovlbrintedannelse i kloakpumpeledninger, fordi iltforbruget i ledningen reduceres markant.

En anden mulighed for energioptimering er at indføre grundlastpumpning, hvor pumpestationen forsynes med to mindre pumper, som alternerer, således én af dem altid er i drift. Det er således sandsynligt, at ledningen kan holdes ren ved lave ledningshastigheder på eksempelvis $0.3 \,\mathrm{ms}^{-1}$, hvis vandet i ledningen aldrig står stille. I vandløb er det eksempelvis muligt at bibeholde en sandbund ved sådanne hastigheder, fordi sedimentet ikke når at bundfælde, som det er tilfældet med den nuværende on-off regulering af pumper. Afhængigt af variationerne i vandføringen i tilløbet til pumpesumpen kan denne metode kræve en forholdsvist stor pumpesump for at udligne variationerne i tilstrømning mellem dag og nat.

8.2 Indblæsning af trykluft

I lange kloakpumpeledninger, som er blevet et udbredt element i nutidens afløbsysstem i Danmark, er der ofte problemer med svovlbrintedannelse. Typisk bekæmpes svovlbrintedannelse med tilsætning af kemikalier og i nogle tilfælde ved rensning med rensegris. En alternativ metode til svovlbritebekæmpelse er at indblæse trykluft i kloakledningen efter endt pumpning. Luftens tilstedeværelse vil bekæmpe svovlbrintedannelse gennem en reduktion af vandets opholdstid og en beluftning af spildevandet. På den måde nedsættes den iltfrie opholdstid, hvor svovlbrindedannelsen foregår. I projektet analyseres effekten af luftindblæsning i en kloakpumpeledning i forsyningsområdet for Brønderslev Spildevand A/S. På denne ledning har luftindblæsningen fjernet svovlbrintedannelse uden en nævneværdig forøgelse af pumpestationens energiforbrug. Erfaringerne fra denne kloakledning forsøges omsat til et fuldskalaforsøg med luftindblæsning i en kloakpumpeledning udført i samarbejde med Mariagerford Vand A/S. Analyserne i de to pumpeledninger viser, at luftindblæsning i nogle tilfælde er et effektivt middel til svovlbrintebekæmpelse, men ikke kan betragtes som et universelt virkemiddel. Luftindblæsning er mest egnet på ledninger med lille ledningsdimension, høj strømningshastighed og et jævnt stigende længdeprofil med flere mindre pukler undervejs. I større ledninger og i ledninger med markante højdepunkter kan luften såldes samle sig i store luftlommer, som øger modtrykket og dermed nedsætter pumpeydelsen markant.

Der er stadigvæk behov for flere forsøg med luftindblæsning i kloakpumpeledninger, for at fastlægge mere håndgribelige kriterier for hvornår luftindblæsning er et effektivt virkemiddel. Specielt kan CFD-simuleringer af strømninger i en hel ledning kombineret med fysiske forsøg øge forståelsen af luftens strømningsmønstre og dermed forståelsen af metodens anvendelighed. På ledninger, hvor luftlommerne øger modtrykket og dermed reducerer pumpernes ydelse, kan en mulig løsning være at erstatte cirkulationspumperne med stempelpumper, der yder tilnærmelsesvist konstant vandføring uafhængigt af modtrykket. På den måde er det muligt at trykke store luftansamlinger gennem systemet, men der er samtidig risiko for at pumpesystemet ødelægges af trykket i ledningen.

8.3 Optimering af pumpesumpes selvrensningsevne

I dette projekt er muligheden for at analysere og optimere selvrensningsevnen af pumpesumpe ved hjælp af CFD-simuleringer blevet undersøgt. Gennem en negligering af vandspejlsvariationerne i pumpesumpen under pumpedrift har det været muligt at analysere den nuværende selvrensningsevne i to eksempler på pumpesumpe. I begge pumpesumpe vil der forekomme aflejringer af sand og grus, fordi de strømmende kræfter ikke er tilstrækkelige til at transportere disse sedimentfraktioner gennem pumpesumpen. Derudover er der i begge pumpesumpe lokaliseret områder, hvor der vil forekomme permanente aflejringer af finkornet organisk materiale. Inden en pumpesumps selvrensningsevne optimeres skal det overvejes, om optimeringen medfører en række mere alvorlige konsekvenser, herunder eksempelvis øget risiko for luftindtrængen, øget slitage af pumpehjulet eller mulighed for permanente sedimentaflejringer i pumpeledningen. I de to pumpesumpe vurderes det derfor primært at være hensigtsmæssigt at reducere områderne med permanente finkornede aflejringer. I den ene pumpesump forhindres permanente aflejringer i et område nedstrøms for sugeledningens indtag ved etableringen af en banket, mens der i den anden er udarbejdet et forslag til et skyllesystem, der kan sætte pumpesumpens vandvolumen i rotation, som dog på grund af vandmassens inerti kræver en langvarig skylning, hvis hele vandvolumenet skal sættes i rotation.

Negligeringen af vandspejlets variationer giver en detaljeret beskrivelse af strømningsmønstrene i pumpesumpene og samtidig en realtistisk beregningstid. Forsimplingen betyder imidlertid, at den tidslige opbygning af bundforskydningsspændingerne, når pumpesumpen tømmes, ikke modelleres korrekt. I øjeblikket kræver en beregning med frit vandspejl, at luftfasen indkluderes i simuleringerne, hvilket giver anledning til en stor beregningstid. Hvis CFD-simuleringer i fremtiden skal udbredes ved design af pumpesumpe kunne en række tilføjelser til DHIs Mike 3 være et vigtigt skridt på vejen. I Mike 3 er der således implementeret en beregningsmetode, hvor der regnes på frie strømninger uden behov for diskretisering af luftfasen. Det nuværende udvalg af mehsere og turbulensmodeller er imidlertid ikke optimalt til mindre geometrier, fordi de er udvalgt med henbilk på at fungere optimalt i store åbne systemer som eksempelvis fjorde. Anvendelsen af Mike 3 til CFD-simuleringer af pumpesumpe rummer desuden perspektiver fordi spildevandsbrancen allerede i stort omfang bruger DHIs programpakker.

Key Points

Erfaringerne med at driftsoptimere lange kloakpumpeledninger kan summeres i følgende key points.

- På flade pumpeledninger er der potentiale for energibesparelser på op mod 60%, hvis ledningshastigheden reduceres.
- Ulempen ved en sådan energioptimering er en øget risiko for sedimentaflejringer, som kan øge pumpens energiforbrug og dermed udhule potentialet for besparelser.
- Ved at overvåge trykket i pumpeledningen er det muligt at opnå et dynamisk kendskab til eksempelvis ledningens ruhed, pumpens slid og luftindhold på ledningen.
- Trykmålingerne kan indgå i en energioptimering, idet de kan danne grundlaget for en behovsstyret skylning af pumpeledningen, hvis ruheden øges ved den reducerede ledningshastighed.
- En analyse af en sådan driftsstrategi viser, at det med den nuværende praksis for projektering af pumpesumpe er vanskeligt at opnå en effektiv skylning af ledningen, fordi pumpesumpens magasineringsvolumen er for lille til at muliggøre en effektiv rensning.
- I fremtiden kan energioptimeringen med hydraulisk rensning blive implementeret, hvis der samtidig etableres større pumpesumpe. De store pumpesumpe giver desuden mulighed for tilrettelægning af pumpning efter døgnets variation i elpriser.
- Indblæsning af trykluft kan betragtes som et alternativ til traditonelle metoder til svolvbrintebekæmpelse i kloakpumpeledninger.
- Den indblæste luft forkorter den iltfrie opholdstid, idet luften fortrænger spildevand og samtidig tilfører ilt under spildevandets transport.
- Undersøgelsen af luftindblæsning i to kloakpumpeledninger viser, at luftindblæsning ikke er et universelt virkemiddel, men i nogle ledningstyper er væsentligt billigere end kemikalietilsætning.
- Luftindblæsningen er særligt hensigtsmæssig i ledninger med lille rørdiameter, høj ledningshastighed og et jævnt stigende længdeprofil med få pukler undervejs.
- Kommercielle CFD-softwarepakker kan anvendes til analyse og optimering af pumpesumpes selvrensningsevne.
- Inden selvrensningen af en pumpesump optimeres er det vigtigt at sikre, at ændringerne ikke medfører alvorlige driftsproblemer. Eksempelvis kan en reducering af det permanente volumen medføre øget risiko for luftindtrængen ligesom øget transport af grus kan forøge pumpens slitage.
- Udbredelsen af CFD-simuleringer i designet af pumpesumpe kan øges, hvis DHI laver en række ændringer i Mike 3, således programmet er anvendligt i små geometrier.

- [1] Viking Pump, Inc. Efficiency and Life-Cycle-Cost Calculation [Pump School]; 2007.
- [2] Volk M. Pump Characteristics and Applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2013.
- Karving H, Clemens FHR, v Noortwijk JM. Statistical Modeling of the Serviceability of Sewage Pumps. Journal of Hydraulic Research. 2006;132(10):1076–1085.
- [4] Aalborg Kommune. Spildevandsplan 2008-19. Aalborg; 2008.
- [5] Nicolajsen O. Præsentation om seperatkloakering i Kongerslev [Slideshow]. Nørresundby: Aalborg Forsyning, Kloak A/S; 2013.
- [6] EnviDan A/S. Ledningsføring for trykledningen fra pumpestation på Syrenvej i Kongerslev [Oversigtskort udarbejdet af Aske Malvang Kristensen]. Aalborg; 2012.
- [7] Holstebro Kommune. Spildevandsplan 2011 2016. Holstebro; 2011.
- [8] EnviDan A/S. Pumpekurver for Hildrostal D03U-SHN1+DFM1X-G160Q Pumpe [Datablad]. Aalborg; 2012.
- Hald MA. Computerbaseret fjernovervågning af pumpesystemers behov for vedligehold [Afgangsprojekt på MSc i Vand og Miljø på Aalborg Universitet]; 2012.
- [10] Vandsektorens Teknologiudviklingsfond. EKG-system fra sundhedssektoren bruges til computerovervågning af pumpesystemer [Projektbeskrivelse]. Skanderborg; 2012.
- [11] Ellison Sensors. Genspec GS4200-USB [Datablad]. Wrexham; 2014.
- [12] Measurement Computing. USB-1208FS/LS/1408FS Series Datasheet [Datablad]. Norton; 2014.
- [13] GE Measurement & Control. UNIK 5000 Pressure Sensing Platform [Produktblad]; 2012.
- [14] Larsen T, Arensman M, Neerup-Jensen O. Monitoring of Efficiency of Sewer Pump Systems on Basis of Pressure Observations. 2014;Ikke publiceret.
- [15] Wylie EB, Streeter VL. Fluid Transients in Systems. 1st ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc; 1993.
- [16] Larsen T. Water Hammer in Pumped Sewer Mains. Aalborg: Aalborg University, Department of Civil Engineering; 2012. ISSN 1901-7286. DCE Lecture Notes No. 29.
- [17] Zill DG, Cullen MR. Differential Equations with Boundary-Value Problems. 7th ed. Belmont: Brooks/Cole Cengage Learning; 2009.
- [18] DiracDelta. Air Spring [DiracDelta Science and Engineering Encyclopedia]; 2014.

- [19] Rebild Kommune. Forslag til Spildevandsplan 2014-2017. Støvring; 2014.
- [20] Rebild Vand og Spildevand A/S. Møde med Bjarne Vestby Jensen. Skørping; 2015.
- [21] Brorsen M, Larsen T. Lærebog i Hydraulik. 2nd ed. Aalborg: Aalborg Universitetsforlag; 2009.
- [22] Winther L, Linde JJ, Jensen HT, Mathiasen LL, Johansen NB. Afløbsteknik. 6th ed. Lyngby: Polyteknisk Forlag; 2011.
- [23] Jensen TC. Pumpesystemer i sparrebassiner [Oplæg ved Pumpetræf 2015]. Tilst; 2015.
- [24] Zhang L, Schryver PD, Gusseme BD, Muynck WD, Boon N, Verstraete W. Chemical and Biological Technologies for Hydrogen Sulfide Emission Control in Sewer Systems: A Review. Water Research. 2008;42:1–12.
- [25] Salomon I. Til kamp mod svovlbrinte. danskVAND. 2003;(8).
- [26] Mariagerfjord Vand A/S. Takstblad for Mariagerfjord Vand a|s fra og med den 1. januar 2015 - Spildevandsforsyning; 2015.
- [27] Lauchlan CS, Escarameia M, May RWP, Burrows R, Gahan C; HR Wallingfort Limited. Air in Pipelines - A Litterature Review. 2005;(SR 649).
- [28] Tanaka N, Takenaka K. Control of Hydrogen Sulfide and Degradation of Organic Matter by Air Injection into a Wastewater Force Main. Water Science Technology. 1995;31(7):273-282.
- [29] US Environmental Protection Agency. Design Manual, Odor and Corrortion Control in Sanitary Sewage Systems and Treatment Plants. Washington, D.C: EPA; 1985.
- [30] Tanaka N, Hvitved-Jacobsen T, Ochi T, Sato N. Aerobic-Anaerobic Microbial Wastewater Transformations and Re-Aeration in an Air-Injected Pressure Sewer. Water Environment Research. 2000;72(6):665–674.
- [31] Google. Google Maps [Højdemodel]. Mountain View; 2015.
- [32] Henze M, Harremoës P, la Cour Jansen J, Arvin E. Teoretisk spildevandsrensning biologiske og kemiske processer. 3rd ed. Lyngby: Polyteknisk Forlag; 2006.
- [33] Rørcenteret. Vakuumsystemer i bygninger. Taastrup: Teknologisk Institut; 2006.
- [34] Mariagerfjord Vand A/S. Møde med Mariagerfjord Vand A/S. Hadsund; 2015.
- [35] Johansen C, Meldgaard H. Transport af kohæsive sedimenter i Grådyb tidevandsområde. Aalborg: Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet; 1993.
- [36] Johansen C. Dynamics of Cohesive Sediments. Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University. 1998;(16).
- [37] Ferziger JH, Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd ed. Berlin: Springer; 2002.

- [38] DHI. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute; 2012.
- [39] Aalborg Forsyning, Kloak A/S. Tegningsmateriale for pumpestationen på Syrenvej, Kongerslev. Nørresundby; 2008.
- [40] Desmukh TS, Gahlot VK. Simulation of Flow Through a Pump Sump and its Validation. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. 2010;4(1):7–17.
- [41] Knapp RT. Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behaviour. American Society of Mechanical Engineers. 1937;59(11):683-689.
- [42] Krogstad HE. Digitization [Matlab-funktion til digitalisering af plots]. Trondheim; 2006.
- [43] Marchal M, Flesch G, Suter P. The Calculation of Waterhammer Problems by Means of the Digital Computer. ASME. 1965;.
- [44] Wan W, Huang W. Investigation on complete characteristics and hydraulic transient of centrifugal pump. Journal of Mechanical Science and Technology. 2011;25(10):2583-2590.
- [45] Thanapadi P, Prasad R. Centrifugal pump transient characteristics and analysis using the method of characteristics. International Journal of Mechanical Science. 1995;37(1):77–89.
- [46] Billauer E. Peak Detection [Matlab-funktion til detektering af lokale ekstrema]. Haifa; 2012.
- [47] Reno-FF. Produktinformation for Reno-FF 705/150 kompressor [Datablad]. Give; 2014.
- [48] Young HD, Freedman RA, Ford L. University Physics. 12th ed. Pearson; 2008.
- [49] Rouhani SZ, Sohal MS. Two-phase Flow Patterns: A Review of Research Results. Progress in Nuclear Energy. 1983;11(1):219–259.
- [50] Taitel Y, Dukler AE. A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. AIChE Journal. 1976;22(1):47–54.
- [51] Barnea D, Shoham O, Taitel Y. Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes: Comparison of Experimental Data with Theory. International Journal of Multiphase Flow. 1980;6(3):217-225.
- [52] Bousso S, Daynou M, Fuamba M. Numerical Modelling of Mixed Flows in Storm Water Systems: Critical Review of Literature. Journal of Hydraulic Engineering. 2013;139(4):385–396.
- [53] CD-adapco. USER GUIDE STAR-CCM+ (\mathbb{R}) ; 2014.
- [54] Yin C. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics (CFD) [PhD-Kursus]. Aalborg; 2014.

I projektet er der lavet undersøgelser på en række forskellige pumpestationer. Ledningsdata og målinger fra systemerne er samlet på den vedlagte bilags CD, hvis indhold præsenteres i dette bilag. Endeligt indeholder bilaget en vejledning til anvendelse af målekassen.

- A.1 Brug af målekasse
- A.2 Syrenvej, Kongerslev
- A.3 Smedegårdvej, Tvis
- A.4 Ny Kærvej, Støvring
- A.5 Strandvejen, Gerå
- A.6 Vestvejen, Als

B. Beregning af specifikt energiforbrug

Potentialet for at optimere energiforbruget i lange pumpeledninger kan estimeres ved at beregne det specifikke energiforbrug, i.e. energiforbrug per pumpet kubikmeter vand, ved forskellige ledningshastigheder. I dette bilag præsenteres en metode til beregning af det specifikke energiforbrug ved hjælp af affinitetsligninger.

B.1 Forudsætninger

Beregningen af det specifikke energiforbrug som funktion af ledningshastigheden er baseret på følgende forudsætninger.

- Affinitetsligningerne er gældende for de betragtede pumper.
- Ledningens ruhed forudsættes at være uafhængig af ledningshastigheden. Dette antages at være muligt at overholde i praksis, hvis der implementeres en hydraulisk rensning af ledningen baseret på den målte udvikling af ledningens ruhed.
- Der tages i beregningen ikke højde for energitab i frekvensomformeren, motoren samt koblingen mellem pumpe og motor. I systemer, hvor der allerede er installeret en frekvensomformer vil energitab i frekvensomformeren forøge eventuelle energibesparelser, mens den i systemer uden frekvensomformning vil reducere potentialet for besparelser. Virkningsgraden af frekvensomformere er erfaringsmæssigt i størrelsesordenen 90 %.

B.2 Fremgangsmåde

Beregningen af pumpens specifikke energiforbrug for en given hastighed sker ved følgende fremgangsmåde:

- 1. Digitalisering af pumpekarakteristik og omformning til dimensionsløse kurver for dejningsmoment og tryk.
- 2. Beregning af modtryk i ledningen.
- 3. Bestemmelse af omdrejningstal.
- 4. Beregning af drejningsmoment.
- 5. Bestemmelse af specifikt energiforbrug.

Beregningsfremgangen er inspireret af metoden til beregning af trykstød ved strømsvigt i lange pumpesystemer, hvor den fulde pumpekarakteristik i.e. sammenhængen mellem tryk, vandføring og drejningsmoment er givet i alle fire kvadranter af pumpekarakteristikken. [41] I det følgende beskrives hver enkelt skridt i beregningsgangen i detaljer.

B.2.1 Digitalisering af pumpekarakteristik

Pumpekarakteristikker er sjældent tilgængelige i digital form, hvorfor de må digitaliseres inden beregningen kan foretages. Dette sker som ofte ved manuel aflæsning eventuelt understøttet af digitale værktøjer som eksempelvis [42]. Pumpekarakteristikken beskriver sammenhængen mellem vandføring og tryk samt akseleffekt for en given omdrejningshastighed. Den fulde karakteristik udtrykkes ofte ved hjælp af følgende udtryk [43].

$$W_H(x) = \frac{h}{\nu^2 + \alpha^2} \tag{B.1}$$

$$W_B(x) = \frac{\beta}{\nu^2 + \alpha^2} \tag{B.2}$$

$$x = \pi + \arctan \frac{\nu}{\alpha} \tag{B.3}$$

Hvor:

$W_H(x)$	Trykkurve	[-]
$W_B(x)$	Drejningsmomentkurve	[-]
x	Uafhængig variabel $\in [0, 2\pi]$	[-]
h	Dimensionsløst tryk	[-]
ν	Dimensionsløs vandføring	[-]
α	Dimensionsløst omdrejningstal	[-]
β	Dimensionsløst drejningsmoment	[-]

Tryk, vandføring, omdrejningstal og drejningsmoment er gjort dimensionsløse ved at normalisere med deres respektive værdier ved Best Efficiency Point (BEP). Udtrykkene er udledt af affinitetsligningerne men modificerede for at forhindre, at udtrykkets nævner giver nul i beregninger. Typisk vælges en arctan-funktion, der giver løsninger i intervallet fra $-\pi$ til π . Det betyder, at den normale zone for pumpedrift med positivt omdrejningstal og vandføring findes for $\pi < x < \frac{3\pi}{2}$. Tryk- og drejningsmomentkurverne kan bestemmes inverst indenfor dette interval ved at anvende en metode beskrevet i [44]. Ønskes viden om kurverne udenfor det normale interval er det oftest nødvendigt at anvende empiriske sammenhænge udledt fra lignende pumper. [41] Til en analyse af energiforbrug ved varierende ledningshastighed er det imidlertid tilstrækkeligt kun at kende til det normale pumpeområder, da pumpen under normal drift ikke vil bevæge sig udenfor dette område. På figur B.1 er omformningen fra pumpekarakteristik til tryk- og drejningsmomentkurver illustreret. Først omsættes relationen mellem vandføring og akseleffekt til drejningsmoment ved følgende udtryk.

$$T = \frac{P}{\omega} \tag{B.4}$$

Hvor:

T	Drejningsmoment	$[ML^2T^{-2}]$
P	Akseleffekt	$[ML^2T^{-3}]$
ω	Vinkelhastighed	$[T^{-1}]$

Dernæst normaliseres tryk, vandføring og drejningsmoment i forhold til deres respektive værdier ved BEP. Ud fra de dimensionsløse kurver kan tryk- og drejningsmomentkurverne beregnes.



Figur B.1. Omsætning af pumpekarakteristik til tryk- og drejningsmomentkurver.

B.2.2 Bestemmelse af modtryk

Motivationen for at sænke ledningshastigheden er, at friktionstabet reduceres. I denne beregning bestemmes friktionstabet ved hjælp af Darcy-Weisbachs modstandsformel med anvendelse af Colebrook & Whites udtryk for friktionstallet. [21] Det totale modtryk findes som summen af den geometriske løftehøjde og friktionstabet for forskellige ledningshastigheder svarende til ledningskarakteristikken.

B.2.3 Bestemmelse af omdrejningstal

For en given hastighed bestemmes det omdrejningstal, der giver anledning til en dynamisk løftehøjde svarende til ledningens modtryk. Det kan udtrykkes i følgende trykbalance over pumpen.

$$W_H(x)\left(\alpha^2 + \nu^2\right)H_R - \Delta H = 0 \tag{B.5}$$

Hvor:

H_R	Pumpens dynamiske løftehøjde ved BEP	[L]
ΔH	Ledningens modtryk	[L]

I denne ligning er den dimensionsløse vandføring og modtrykket konstante for en given hastighed. Pumpens dynamiske løftehøjde varierer imidlertid ikke-lineært med omdrejningstallet. Ligningens rod bestemmes numerisk ved hjælp af Newton-Rhapson-proceduren med en linearisering af trykkurven. Ved denne metode bestemmes værdien af venstresiden af ligning (B.5) i et vilkårlig punkt. Et nyt punkt bestemmes som skæring mellem det vilkårlige punkts tangent og førsteaksen. Fortsættes denne procedure vil iterationen konvergere mod løsningen af ligning (B.5), hvorfra omdrejningstallet kan beregnes. Metoden er beskrevet i detaljer i [15].

B.2.4 Beregning af omdrejningsmoment

Når pumpens omdrejningstal for en given hastighed er bestemt kan pumpens drejningsmoment bestemmes fra drejningsmomentkurven.

$$T = W_b(x) \left(\alpha^2 + \nu^2\right) T_R \tag{B.6}$$

Hvor:

 T_R | Drejningsmoment ved BEP [ML²T⁻²]

B.2.5 Bestemmelse af specifikt energiforbrug

Pumpens specifikke energiforbrug, E_s , kan bestemmes for en given hastighed, når omdrejningstal, drejningsmoment, og modtryk er bestemt ved følgende udtryk.

$$E_s = \frac{T\omega}{Q} \tag{B.7}$$

Beregningen foretages for forskellige ledningshastigheder, så det specifikke energiforbrug kan sammenlignes.

C. Direkte estimering af pumpesystemets tilstand

En af metoderne til at decifrere trykmålingerne i pumpesystemer er at bestemme trykniveauet i en række karakteristiske punkter. Målingerne i disse punkter omsættes til en række tilstandsvariable, eksempelvis ledningens ruhed og pumpens slid. I dette bilag beskrives fremgangsmåden i denne metode.

C.1 Forudsætninger

Bestemmelsen af ledningens ruhed og pumpens slid er baseret på en række forudsætninger, som skal være opfyldt, hvis resultaterne af analysen skal være pålidelige. De væsentligste forudsætninger for beregningen er summeret i følgende punkter, og relaterer sig hovedsageligt til validiteten af Joukowskis ligning. [14]

- Start- og stoprampen af pumpen er lille sammenlignet med reflektionstiden for trykbølgerne i ledningen. Det betyder, at Joukowskis ligning er gældende for den ikkestationære strøming efter pumpestart og -stop. Dette er typisk overholdt for lange pumpeledninger, hvor reflektionstiden er flere størrelsesordener større end pumpens startog stoprampe. I kortere ledninger eller i situationer hvor pumpen softstartes over en periode sammenlignelig med reflektionstiden kræves en mere kompliceret modellering. [45]
- Reflektionstiden af trykbølgerne i røret på sugesiden er lille sammenlignet med pumpens accelerationstid, så sugsidens effekt på trykstødet kan negligeres. Røret på sugesiden er typisk kort for at forhindre kavitation i pumpen og ofte udformet i metal, der har en høj trykforplantningshastighed. Det betyder, at denne forudsætning sjældent vil give problemer i metodens anvendelse.
- Trykforplantningshastigheden er tilnærmelsesvist konstant i løbet af det enkelte trykstød. Erfaringer og målinger tyder på, at dette er tilfældet, men tilstedeværelse af større luftlommer tæt på pumpen kan give større variationer i trykforplantningshastigheden. Typisk er længdeprofilet designet, så der ikke forekommer højdepunkter tæt på pumpen, og forudsætningen vil ofte være overholdt.

C.2 Fremgangsmåde

Den grundlæggende udfordring i at bestemme pumpens slid og ledningens ruhed ud fra trykmålinger er at adskille de to fænomenter fra hinanden. Ofte overvåges pumpestationers energiforbrug for på den måde at opdage en aftagende virkningsgrad i systemet. I denne situation er det imidlertid ikke muligt at forudsige hvorvidt en nedgang i virkningsgrad skyldes en øget ruhed i ledningen eller slid af pumpen. Nøglen til at skille de to fænomener ad ligger i den tidslige udvikling af trykket ved pumpestart, som er illustreret i figur C.1.



Figur C.1. Principskitse af trykniveauet ved pumpestart. [14]

Pumpen startes ofte af en flydekontakt, der aktiveres ved en valgt vandstand i pumpesumpen. Det betyder, at trykniveauet lige før pumpen starter er kendt. I trykledningen er trykket lig den geometriske løftehøjde i systemet svarende til det røde punkt på figuren. Pumpen accelererer og åbner kontraventilen, når trykket i pumpen overstiger den geometriske løftehøjde. Pumpestarten danner en overtryksbølge, som forplanter sig gennem ledningen og reflekteres ved oppumpningsbrønden. Det maksmale trykniveau ved pumpen er markeret med en blå prik og forekommer lige efter kontraventilen åbnes. Efter et par reflektioner vil systemet nærme sig en stationær tilstand, som er markeret med en grøn prik på figuren. Hvis de nævnte forudsætninger er overholdte kan pumpens vandføring bestemmes af Joukowskis ligning:

$$\Delta H = \pm \frac{c}{gA} \Delta Q \tag{C.1}$$

Hvor:

ΔH	Trykændring ved pumpestart	[L]
c	Trykforplantningshastighed	$[LT^{-1}]$
g	Tyngdeacceleration	$[LT^{-2}]$
A	Indvendigt tværsnitsareal	$[L^2]$
ΔQ	Endring af vandføring ved pumpestart	$[L^3 T^{-1}]$

Pumpekarakteristikken antages at kunne beskrives med et parabeludtryk på følgende form:

$$H = A + BQ + CQ^2 - DQ^2 \tag{C.2}$$

Karakteristikken skal korrigeres for enkelttab og friktion i hele pumpestationen inden konstanterne A, B og C bestemmes for den nye pumpe eller udgangspunktet for overvågningen. Ved hver pumpestart udregnes vandføringen af ligning (C.1), som indsættes med det maksimale trykniveau i ligning (C.2) til bestemmelse af D, som er et udtryk for forøgede turbulente tryktab og intern recirkulation i pumpen. Når pumpekarakteristikken for den slidte pumpe er kendt kan den stationære vandføring beregnes ved at indsætte det målte stationære driftstryk. På denne måde bestemmes driftspunktet for den slidte pumpe og ledning. Dette kan omsættes til en ækvivalent sandruhed ved hjælp af iteration af Darcy-Weisbachs modstandsformel med anvendelse af Colebrook & Whites formel for friktionstallet. [21]

C.3 Mønstergenkendelse

En vigtigt del af denne metode er at implementere en automatisk genkendelse af pumpestart, -stop samt det maksimale trykniveau i ledningen ved hjælp af mønstergenkendelse. Der findes mange måder at implementere mønstergenkendelse og ofte vælges metoden på baggrund af målingens Signal-to-Noise-forhold (SNR eller S/N). Det maksimale trykniveau umiddelbart efter pumpestart kan genkendes automatisk på flere måder. I dette projekt bestemmes det maksimale trykniveau ved hjælp af en Matlab-funktion til detektering af lokale ekstrema, [46], kombineret med et krav om at trykniveauet skal være nær den statiske løftehøjde et stykke tid før et maksimum. Til at finde pumpestart og -stop tilhørende det maksimale trykniveau foretages en søgning henholdsvist tilbage og fremad i tid fra den maksimale trykniveau. Der indføres også her en række kriterier for hvornår en pumpestart- eller stop er lokaliseret. Kravene er delvist baseret på den tidslige trykniveaugradient, α , og krumning, β . På figur C.2 er trykniveaugradienten og krumningen illustreret for en trykmåling i Kongerslev.



Figur C.2. Variationen af hældningen og krumningen ved en pumpecyklus d. 31. Oktober 2014 i Kongerslev.

For at mindske virkningen af støj udregnes gradienten og krumningen til hvert måletidspunkt ved at tilpasse et andengradspolynomium (C.3) til målinger indenfor et fastlagt tidsskridt, Δt , hvis størrelse afhænger af S/N-forholdet. I Kongerslev anvendes et tidsskridt på 6 sek mens der i Tvis anvendes 16 sek.

$$H = at^2 + bt + c \tag{C.3}$$

$$\alpha = \frac{dH}{dt} = 2at + b \tag{C.4}$$

$$\beta = \frac{d^2 H}{dt^2} = 2a \tag{C.5}$$

Kriterierne for pumpestart, -stop og det maksimale trykniveau kan på komprimeret vis udtrykkes som følger.

Maksimalt trykniveau

1. $H(t - \Delta t) + \Delta H_1 < H(t) > H(t + \Delta t) + \Delta H_1$

Pumpestart

1. $t_{start} < t_{max}$ 2. $abs(H(t) - H_{stat}) < Error_1$ 3. $\alpha(t) < \alpha(t + \Delta t)$ 4. $H(t) + \Delta H_2 < H(t + \Delta t)$

Pumpestop

 $\begin{array}{ll} 1. \ t_{stop} > t_{max} \\ 2. \ abs(H(t) - H(t - \Delta t)) < Error_2 \\ 3. \ H(t) - H(t + \Delta t) < \Delta H_3 \\ 4. \ \alpha(t) > \alpha(t + \Delta t) \\ 5. \ \beta(t) > \beta(t + \Delta t) \end{array}$

Med ord betyder kriteriet for maksimalt trykniveau, at trykniveauet før og efter den maksimale værdi skal være ΔH lavere (#1). Pumpestart findes før det maksimale trykniveau i et punkt (#1), hvor trykniveuaet forinden er tæt på det statiske trykniveau (#2), den tidslige trykniveaugradient stiger (#3) og trykniveauet stiger mere end en fastsat værdi (#4). Pumpestop findes efter det maksimale trykniveau (#1), hvor trykniveuaet før er tilnærmelsesvist konstant (#2), trykniveauet efterfølgende falder mere end end fastlagt værdi, ΔH (#3), den tidslige trykniveaugradient reduceres (#4) og krumningen stiger (#5). De enkelte konstanter, $\Delta t, \Delta H$, og Error afhænger af trykstigningerne ved pumpestart samt støjen på målingerne og bør i praksis tilpasses hver enkelt pumpestation.

D. Modellering af luftlommers effekt på trykstød

En anden metode til decifering af trykmålingerne er at opstille en teoretisk beregningsmodel, der kan tage højde for alle vigtige fænomener i pumpesystemet. Ved at kalibrere denne beregningsmodel er det således muligt at opnå viden om pumpesystemets tilstand. I dette bilag beskrives opsætningen af en beregningsmodel, der kan modellere luftommers effekt på trykstød i et pumpesystem.

D.1 Forudsætninger

Den hyppigst anvendte metode til modellering af trykvariationerne under trykstød er karakteristikmetoden. Det følgende afsnit forudsætter en grundlæggende forståelse af denne metode. Et godt udgangspunkt for læsere, der ikke er bekendte med metoden, er [15]. Udover de klassiske forudsætninger for karakteristikmetoden baseres beregningen af luftlommens effekt på forudsætninger.

- Sammentrykningen og udvidelsen af luftlommen er reversibel og adiabatisk.
- Luftlommen har ikke betydning for strømningsmodstanden i ledningen og kan derfor betrages som en akkumulator udenfor ledningsnettet. Det betyder desuden, at luftlommen ikke flytter sig mellem beregningspunkterne.
- Trykudbredelseshastigheden er upåvirket af luftlommens tilstedeværelse. I kombination med den ovenstående forudsætning betyder dette, at luftvolumenet skal være betydeligt mindre end volumenet i mellem to beregningspunkter.

Forudsætningerne er en forsimpling af den faktiske situation, hvor luftlommen vil give anledning til en øget strømningsmodstand ligesom luftbobler løsrevet nedstrøms for luftlommen vil øge væskens elasticitet og reducere bølgeudbredelseshastigheden.

D.2 Fremgangsmåde

På figur D.1 er vandføringerne i et knudepunkt med en luftlomme skitseret.



Figur D.1. Illustration af vandføringerne i et knudepunkt med en luftlomme.

De to vandføringer ind og ud af knudepunktet bestemmes ved hjælp af de to kombabilitetsligninger.

$$C+:Q_{ind} = \frac{C_P - H}{B_P} \tag{D.1}$$

$$C - : Q_{ud} = \frac{H - C_M}{B_M} \tag{D.2}$$

I denne ligning er konstanterne C_P , C_M , B_P og B_M udelukkende afhængige af trykniveau og vandføring i det foregående tidsskridt, hvorfor kun trykniveau og vandføring er ukendte i ligningerne. I knudepunkter uden en luftlomme kombineres de to kombabilitetsligninger normalt i en kontinuitetsbetingelse og løses explicit. Det er imidlertid en fordel i stedet at bestemme trykniveauet i knudepunktet ved iteration, idet løsningen på den måde ligner løsningen i knudepunktet med en luftlomme. I knudepunkterne uden en luftlomme løses kontinuitetsligningen derfor ved hjælp af intervalhalveringsmetoden. I knudepunktet med en luftlomme inkluderes luftlommens sammentrykning og udvidelse i kontinuitetsligningen. Luftlommen forudsættes at følge den polytrofiske sammenhæng udtrykt ved følgende ligning.

$$PV^{\gamma} = C \tag{D.3}$$

Hvor:

P	Det absolutte tryk i luftlommen	[L]
V	Luftlommens volumen	$[L^3]$
γ	Polytrofisk koefficient	[-]
C	Konstant	$[L^{1+3n}]$

Det absolutte tryk i henholdsvist knudepunkt og luftlomme antages at være ens. For et fastsat startvolumen af luftlommen i knudepunktet vil luftlommen for et givent trykniveau have følgende volumen.

$$V = V_0 \left(\frac{H_{stat} - Z + H_{atm}}{H - Z + H_{atm}}\right)^{1/\gamma} \tag{D.4}$$

Hvor:

V_0	Luftlommens startvolumen	$[L^3]$
H_{stat}	Statisk trykniveau	[L]
Ζ	Ledningens kote ved luftlommen	[L]
H_{atm}	Atmosfæretrykket	[L]
Η	Trykniveauet i beregningspunktet	[L]

Luftlommens påvirkning på kontinuitetsligningen kan dermed bestemmes på baggrund af luftlommens volumenændring.

$$Q_{luft} = \frac{V(t) - V(t - \Delta t)}{\Delta t} \tag{D.5}$$

Når luftlommen vokser vil luften presse vand ud af knudepunktet. Kontinuitetsligningen for knudepunktet med en luftlomme bliver derfor.

$$Q_{ind} - Q_{ud} + Q_{luft} = 0 \tag{D.6}$$

I knudepunktet med en luftlomme løses denne kontinuitetsligning med Newton-Rhapson metoden, som er beskrevet i bilag B. Ved hjælp af start- og randbetingelserne er det således muligt at beregne både vandføring og trykniveau i ethvert knudepunkt langs ledningen for et foruddefineret luftvolumen i et knudepunkt på ledningen.

I kapitel 5 er effekten af en regelmæssigt hydraulisk rensning af en pumpeledning fra Støvring til Annerup blevet undersøgt. Undersøgelsen viste, at renseprogrammet ikke er i stand til at holde ledningens ruhed nede, fordi pumpesumpens volumen begrænser varigheden af renseprogrammet til cirka 2 minutter. I dette kapitel præsenteres forslag til en midlertidig og langsigtet løsning på pumpeledningens driftsproblemer.

E.1 Ændring af stoprampe

I pumpestationen har der været problemer med kraftige vibrationer ved pumpestop på grund af trykstød. Som en konsekvens heraf skal bolte ofte strammes i pumpestationen, ligesom trykstødene har beskadiget et element til afsending af rensegrise i pumpestationen og ødelagt en kontraventil. De kraftige trykstød har formentligt været forværret af luftlommer i ledningens højdepunkter, hvorfor der på ledningsstrækningen er installeret automatiske udluftningsventiler. Der har været en del udfordringer i indkøringen af udluftningsventilerne, blandt andet fordi de blev ødelagt ved ventillukningen. Der er efterfølgende blevet installeret en begrænser i afgangen fra udluftningsventilerne den 1. juli 2014, hvilket har fjernet problemerne med ødelagte ventiler, fordi ventilerne lukker langsommere. Derudover softstartes og -stoppes pumperne med en forholdsvist stor rampe for at reducere trykstødene. Udluftningsventilerne og ændringen af start- og stopramperne har reduceret trykstødsproblemerne markant, men de store stopramper har givet problemer med hyppige tilstopninger af pumpehjulet. I pumpestyringen er der implementeret en reversering af pumpens omdrejning, når strømmålinger indikerer en begyndende tilstopning. Hvis ikke proceduren fjerner tilstopningen i løbet af tre cykler med reverseret omdrejning af pumpehjulet sendes en alarm til driftspersonalet om tilstopning.

Årsagen til tilstopningen er sandsynligvis, at pumpehjulet ved det reducerede omdrejningstal ikke er i stand til fjerne fremmedlegmer fra pumpehjulet, som derfor akkumuleres i pumpen. Anvendelsen af en forholdsvist stor stoprampe bevirker desuden, at der pumpes cirka 1 m^3 spildevand efter pumpesumpens stopniveau er nået. Det medfører en reduktion af sugeledningens dykning på cirka 5 cm, som ikke er forudsat ved valget af stopniveau, og derfor øger risikoen for luftindtrængen. Stoprampen er valgt i en situation, hvor luftlommer har haft en negativ indvirkning på trykstødene ved pumpestop. Efter installationen af automatiske udluftningsventiler er luftlommer ikke et større problem i forhold til trykstød, hvorfor stoprampen forventes at kunne forkortes. Den 25. marts 2015 er der udført forsøg med ændringen af stoprampen på pumpestationens tilbageværende Pumpex-pumpe. Stoprampen er i pumpesystemets SRO-anlæg ændret til henholdsvist 10 og 50 sekunder, hvorefter effekten af ændringen kan analyseres ud fra trykmålingerne. På figur E.1 ses trykmålingerne ved de to stopramper.



Figur E.1. Målt tryk i pumpeledningen den 25. marts 2015 med en stoprampe på 10 sekunder (tv) og 50 sekunder (th) af Pumpex-pumpen. Det statiske tryk er målt til 1 barg. Målingerne er digitaliseret manuelt fra SRO-systemet.

Det maksimale tryk i pumpeledningen forekommer umiddelbart efter pumpen starter, som følgeligt ikke er påvirket af den reducerede stoprampe. Ved pumpestop bevirker forkortelsen af stoprampen til 10 sekunder en forøgelse af undertrykket ved pumpstop med cirka 0,2 bar. Det betyder, at trykniveauet ved den første undertryksbølge efter pumpestop befinder sig cirka 8 mVs under niveauet i oppumpningsbrønden. I henhold til ledningens længdeprofil, som ses på figur 5.1, vil dette ikke give anledning til kavitation nær oppumpningsbrønden. Der er efterfølgende foretaget forsøg med en reducering af stoprampen til 10 sekunder i alle pumpestationens pumper. Trykmålingerne viser, at der heller ikke her opstår kritiske trykniveau ved pumpestop. Baseret på forsøget med nedsætning af stoprampen er det således muligt at reducere stoprampen til 10 sekunder. Efter en måneds drift med stopramper på 10 sekunder har der ikke været udkald til tilstoppede pumper, hvilket bekræfter forventningen om at stoprampen var årsagen til tilstopningerne.

E.2 Ændring af pumpebestykning

Den langsigtede plan for forbedring af pumpesystemets drift er at udskifte pumpebestykningen og dermed opnå en ledningshastighed, der overholder selvrensningskravet. Planen er i øjeblikket at udskifte pumpebestykningen til Flygt NP 3301 MT 3 632-pumper, som kan yde 178 ls⁻¹ ved normal drift. Dette svarer til en ledningshastighed på 1 ms⁻¹. Hvis pumpeledningen forudsættes at have en ruhed på 0,8 mm vil bundforskydningsspændingen i ledningen være cirka 3 Pa. Til sammenligning giver de nuværende pumper en bundforskydningsspænding i ledningen på cirka 1 Pa. Den markante forøgelse skyldes, at bundforskydningsspændingen vokser proportionelt med kvadratet på ledningshastigheden. Udskiftningen vil dermed bevirke, at pumpeledningen lever op til det gængse dimensioneringskriterie for fælleskloakker på 3 til 4 Pa, og at ledningen dermed sandsynligvis vil være selvrensende under normal drift. [22]

Ifølge beregninger vil udskiftningen til Flygt-pumperne medføre en årlig reduktion i energiforbruget til pumpning på cirka 25 000 kr, fordi de nye pumper har en markant højre virkningsgrad end Pumpex-pumperne. Set over pumpernes forventede levetid på 20 år vil energibesparelsen kunne forrente en investering på cirka 340 000 kr. Dette svarer omtrent til prisen på indkøb og montering af to nye Flygt-pumper og udskiftning af sofstartere, kontakorer, koblingsfødder og guiderør. [20] I beregningen er der ikke taget højde for gradvis nedsættelse af pumpens ydeevne på grund af slid, men da der på den anden side ikke er indregnet besparelser i afledningsafgift som følge af en potentiel reduceret svovlbrintedannelse, må estimatet forventes at være realistisk.

Ved valget af Flygt-pumperne er der forudsat en ønsket ledningshastighed på 1 ms^{-1} , selvom selvrensningskravet normalt fastlægges til 0.8 ms^{-1} . [22] I valget af pumper er der på den måde indlagt en sikkerhed, idet ydelsen af pumperne må forventes at blive reduceret i løbet af deres levetid. For at indlægge yderligere sikkerhed i pumpevalget er det værd at overveje at installere pumperne med en 55 kW-motor, selvom N 3301-pumpen med et pumpehjul på 424 mm kan drives af en 45 kW-motor. Ved at vælge en 55 kW-motor er det således muligt at udskifte pumpehjulet til et 444 mm-hjul, hvis det i fremtiden viser sig nødvendigt at øge ledningens kapacitet. Ved normal drift kan pumpen med et 444 mm-hjul således yde 220 ls⁻¹, hvilket svarer til en ledningshastighed på knap 1.25 ms^{-1} . Ulempen ved at vælge en større motor er, at den det specifikke energiforbrug med et 424 mm-hjul øges med omkring 0.6% fra 0.0647 til $0.0651 \text{ kWh m}^{-3}$, ligesom anlægsomkostningerne øges. Endeligt øges motorens mærkestrøm fra 93 A til 119 A, hvilket kan betyde øgede krav til el-installationer i pumpestationen.

E.3 Trykstød ved strømudfald

Selvom udskiftningen af pumperne i økonomisk henseende er et rentabelt tiltag er det ikke sikkert, at det kan løse alle driftsproblemer i pumpesystemet. En forøgelse af ledningshastigheden vil således forværre trykstødene på ledningen. For at undersøge trykstødene i pumpesystemet opsættes en trykstødsberegning efter karakteristikmetoden. I beregningen er Flygt 3301-pumpens pumpekarakteristik indsat som den opstrøms randbetingelse, mens oppumpningsbrønden beskrives ved en fastholdt trykrand. Det betyder, at beregningen forudsætter konstant niveauforskel mellem oppumpningsbrønden og pumpesumpen. I beregningen er der anvendt en ækvivalent sandruhed på 0,3 mm, som også indeholder enkelttab på ledningen. Der er i beregningen ikke medtaget påvirkninger af luftlommer i ledningens højdepunkter og trykudbredelseshastigheden er bestemt til $300 \,\mathrm{ms}^{-1}$ ud fra trykmålingerne i pumpestationen. På figur E.2 ses resultatet af en trykstødsberegning med momentan nedbremsning af Flygt-pumpen. I praksis vil pumpen på grund af inerti ikke stoppe momentant, så beregningen kan betragtes som et konservativt estimat på situationen ved strømsvigt under pumpning. I beregningen er der ikke taget højde for pumpens strømningsmodstand, så trykniveauet ved pumpen kan ikke reduceres under pumpesumpens niveau.



Figur E.2. Beregnet maksimalt og minimalt trykniveau ved momentan opstart og nedbremsning af en Xylem NP 3301 MT 3 632-pumpe.

Beregningen indikerer, at der er risiko for kavitation i ledningen ved strømsvigt. Kavitationen er ikke direkte inkluderet i modellen, men da undertrykket er over 10 mVs vil der udvikle sig en kavitet cirka 350 meter fra oppumpningsbrønden, når den første undertryksbølge bevæger sig gennem systemet. Under normal drift vil pumperne skulle nedbremses af en softstarter for at undgå kavitation, hvorfor der kun vil forekomme kavitation i ledningen ved uforudseete strømafbrud under pumpning. Gennem ledningens levetid har den ofte været udsat for kavitation, og det forventes derfor ikke at give anledning til sammenklapning af ledningen.

E.4 Energiregnskab for pumpecyklus

I pumpestationen i Støvring er der i starten af marts installeret en kW-måler, som registrerer den optagne effekt af Flygt-pumpen, som erstatter den harvarerede Pumpex-pumpe indtil pumpebestykningen ændres. Strømmålingerne anvendes til en undersøgelse af potentialet for energioptimering gennem fastsættelse af antallet af pumpestarter. Ved projektering af pumpestationer er det normal praksis at tilstræbe, at pumpen maksimalt starter 10-15 gange i timen. Kravene til antallet af pumpestarter er opstået i en tid, hvor elektriske kontakter og skift mellem motorens vindinger medførte betydeligt slid ved hver pumpestart. De slidfølsomme dele er idag blevet udfasede af nye løsninger, og kravet til antallet af pumpestarter bør derfor idag ske med udgangspunkt i energihensyn. I én pumpning i Støvring pumpes omkring 13,3 m³ spildevand, hvorved der med Flygt-pumpen bruges cirka 1,4 kWh. Heraf anvendes cirka 66 % til at drive pumpen ved dens driftspunkt, 30 % til opstart af pumpningen og 4 % til nedbremsning. Målingen viser, at der specielt ved pumpestarten er potentiale for energibesparelse, da der her bruges omkring 35 % mere energi per pumpet kubikmeter spildevand sammenlignet med stationær drift. Enhver pumpestart er af følgende årsager forbundet med et øget energiforbrug sammenlignet med stationær drift.

- 1. På grund af trykstød arbejder pumpen ved et højere tryk og en lavere vandføring end ved driftspunktet. Da pumpen typisk er valgt, så den har en maksimal virkningsgrad tæt på driftspunktet vil pumpen i opstarten have en lav virkningsgrad. Det betyder, at en større del af den tilførte energi ved opstarten tabes i pumpen
- 2. Hele vandmassen i pumpeledningen skal acceleres ved hver pumpning. Den tilførte kinetiske tabes, når pumpen stopper.

Derudover tabes en mindre energimængde under rørvæggens deformationer ved trykstød. I pumpestationen i Støvring pumpes cirka $3,2 \text{ m}^3$ spildevand ved pumpestarten, som på grund af de øgede energitab medfører et øget energiforbrug på 0,11 kWh ved hver pumpestart. På figur E.3 sammenholdes dette øgede energiforbrug med de førnævnte kilder til energitab ved pumpestart. Det ses, at $^{3}/_{4}$ af det øgede energiforbrug skyldes reduceret virkningsgrad af pumpen, mens cirka $^{1}/_{5}$ af energitabet går til at sætte vandet i bevægelse.



Figur E.3. Målt forøgelse af energiforbrug ved pumpestart sammenlignet med stationær drift fordelt på kilder til tab.

Da der ved hver pumpning tabes en betydelig mængde energi, kan det i nogle tilfælde medføre energibesparelser at pumpe få gange med lang varighed. I pumpesystemet i Støvring startes pumperne cirka 200 gange i døgnet, og hvis antallet af starter eksempelvis halveres er det således muligt at spare cirka 4100 kWh årligt. Idet pumpestationen årligt bruger cirka 90 000 kWh svarer dette til en reduktion på cirka 4,5 %. Baseret på denne analyse overvejes det i øjeblikket at lave en pumpebestykning med grundlastpumpning, som er karakteristisk ved lange pumpevarigheder med lave ledningshastigheder. Grundlastpumpen kan suppleres af en større pumpe, eksempelvis Flygt NP 3301 MT 3 632-pumpen, som kan bruges til hydraulisk rensning af ledningen og øge ledningens kapacitet under regn. Det største forbehold ved denne metode er imidlertid usikkerheden om hvorvidt det er muligt at holde ledningen ren ved denne pumpestrategi.

Indblæsning af trykluft i kloakpumpeledninger ved hjælp af en kompressor kan fungere som svovlbrintebekæmpelse. I dette bilag beregnes indblæsningsvoluminet i pumpeledningen i Gerå ved hjælp af en massebalance for kompressorens tank. Derudover præsenteres relevant litteratur om to-fasede strømninger, som anvendes til en karakterisering af strømningsformen i Gerå-ledningen. Endeligt diskuteres muligheden for at modellere luftindblæsningens påvirkning på pumpeydelsen.

F.1 Beregning af kompressorens indblæsningsvolumen

Den to-cylinderede stempelkompressor har et slagvolumen på 705 Nl min⁻¹, som ved atmosfærisk tryk i tanken udnyttes fuldstændigt. Den effektive ydelse (engelsk: Free Air Delivery, FAD), ved atmosfærisk modtryk er derfor 705 Nl min⁻¹. Øges trykket i tanken reduceres ydelsen af kompressoren. Kompressoren er således angivet til at have en effektiv ydelse på 530 Nl min⁻¹ ved et tryk på 6 barg i tanken. [47] Normalt er stempelpumpers ydelse tilnærmelsesvist uafhængig af modtrykket, men den reducerede ydelse i kompressoren er sandsynligvis et udtryk for, at motorens omdrejningstal reduceres ved øget modtryk. Den effektive ydelse er således ikke kun bestemt af stemplets volumen, men også af motorens omdrejningstal. Ved et besøg i pumpestationen d. 27. januar 2015 er det observeret, at frekvensen af støjen fra kompressoren reduceres i takt med kompressoren fyldes. Dette underbygger forklaringen om at motorens omdrejningstal er afhængigt at modtrykket.

Ved samme besøg er kompressorens driftstid målt til 135 sekunder baseret på tre pumpecykler. At kompressoren skal køre i cirka et minut efter indblæsningen er stoppet indikerer, at den indblæste luftmængde i pumpeledningen overstiger kompressorens effektive ydelse under indblæsningen. Med kenskabet til kompressorens ydelse er det muligt at estimere det indblæste luftvolumen i hver pumpecyklus og dermed det fortrængte vandvolumen. Beregningen af det indblæste luftvolumen er baseret på en række forsimplende forudsætninger, hvoraf de væsentligste er listet nedenfor.

- Både kompressoren, tilkoblingen til trykledningen såvel som selve trykledningen er tæt, således al indblæst luft transporteres til oppumpningsbrønden. På denne måde er det muligt at lukke massebalancen for kompressoren og bestemme indblæsningsvoluminet.
- Kompressoren har ved stilstand et tryk på nøjagtigt 7 barg og startes og stoppes uden hysterese. Ved besøget i pumpestationen er det konstateret, at kompressoren starter mellem 1 og 2 sekunder efter indblæsningen er startet, hvilket indikerer en relativt lille hysterese i kompressoren.
- Den atmosfæriske luft forudsættes at overholde idealgasligningen. Denne forudsætning er i praksis ofte acceptabel for atmosfærisk luft ved lav temperatur og tryk. [48]
- Luften forudsættes at blive udvidet og sammentrykket ved en isotermisk proces i.e. ved konstant temperatur. Det er sandsynligvis ikke korrekt for den hurtige sammentrykning i kompressoren, men en nøjagtig beskrivelse af temperaturændringerne er ikke mulig med

det tilgængelige datamateriale, hvorfor gassen forudsættes at have en konstant temperatur på 20 °C i kompressoren.

- Kompressorens effektive ydelse ved varierende modtryk forudsættes at være givet ved en lineær sammenhæng, bestemt af den angivne ydelse ved atmosfæretryk og 6 barg.
- Friktionen i ledningen på kompressorens 1/2-tommer afgang negligeres, således afgangsstrømmen er bestemt ved modstanden i magnetventilen.

Beregningen af det indblæste luftvolumen sker ved at opstille en dynamisk massebalance for kompressorens tank under og efter luftindblæsningen. Massestrømmen af luft ind i tanken er givet ved den effektive ydelse ved tankens tryk, mens massestrømmen ud fra tanken beregnes ved følgende udtryk.

$$M_{ud} = \rho A C_v \sqrt{2g\Delta H} \tag{F.1}$$

Hvor:

M_{ud}	Massestrøm ud af tanken	$[M \ T^{-1}]$
ρ	Luftens densitet i tanken	$[ML^{-3}]$
A	Afgangsledningens tværsnitsareal	$[L^2]$
C_v	Ventilkoefficient	[-]
g	Tyngdeacceleration	$[LT^{-2}]$
ΔH	Trykforskel mellem tank og pumpeledning	$[M T^{-2} L^{-1}]$

Trykket i pumpeledningen er givet ved trykmålingerne i pumpeledningen, hvorved trykforskellen mellem tank og pumpeledning kan bestemmes i hvert tidsskridt i beregningen. Da friktionen i ledningen fra kompressorens tank til pumpeledningen er ukendt bliver ventilkoefficienten en kaliberingsparameter. På figur F.1 ses en kalibereret modelberegning over trykket i kompressorens tank. Beregningen giver en driftstid af kompressoren på 135 sekunder og en indblæst luftmasse på 1,7 kg.





F.2 Relevant litteratur

Siden slutningen af 1930'erne har to-fasede strømninger af gasser og væsker i trykrør været genstand for massiv forskning. En stor del af forskningen har været drevet af olieindustrien, idet olie og gas fra boreplatforme ofte transporteres i én transportledning. Derudover anvendes luftindblæsning i nogle tilfælde til oppumpning af olie, ligesom flere undersøgelser har haft til formål at bidrage til forståelsen af strømninger i kølesystemerne på atomkraftværker. [49] Den største del af forskningen i to-fasede strømninger har fokuseret på en karakterisering af, hvordan faserne bevæger sig i rør. En forståelse heraf er således udgangspunktet for håndtering af langt de fleste problemer relateret til to-fasede strømninger i trykrør, herunder hydraulisk fjernelse af luftlommer. Grundlæggende set vil luftens bevægelse afhænge af forholdet mellem væskens forskydningsspåvirkning på luften samt luftens overfladespænding og opdrift. De tidligste undersøgelser af luftens transportform er baseret på en eksperimentel bestemmelse af luftens strømningsform ved variationer af rørets hældning, rørdiameteren samt volumensrømmen af luft og vand. Typisk blev transportformen vurderet visuelt i transperante rør, men der er også anvendt mere systematiske metoder som eksempelvis fotografering og røntgenscanning [49]. Et af de mest kendte eksperimenter er beskrevet i [50], hvor eksperimenterne blev suppleret af teoretiske overvejelser. Forsøgene har givet anledning til en karakterisering af forskellige strømningsformer. I litteraturen findes op til 84 fagtermer for forskellige strømningstyper, som for horisontale rørledninger falder ind under følgende kategorier. [27]

- Boble-strømning (en. Bubble flow). Ved lav volumenstrøm af luft sammenlignet med vand vil luften være fordelt over rørets tværsnit som bobler. Boblerne bevæger sig tilnærmelsesvist med samme hastighed som vandfasen.
- Plug-strømning (en. Plug flow). Øges luftstrømmen vil boblerne samles og forme større luftlommer, som transporteres langs rørets krone.
- Glat lagdelt strømning (en. Stratified smooth flow). Ved lave volumenstrømme af både vand og luft vil der ofte ske en klar lagdeling i rørets tværsnit.
- Bølget lagdelt strømning (en. Stratified wavy flow). Øges volumenstrømmen af luft vil der dannes en bølget og mere ujævn lagdeling.
- Slug-strømning (en. Slug flow). Hvis bølgerne bliver tilpas store vil de nå rørets krone og opdele ledningens længde i klumper af henholdsvist luft og vand.
- Strømning i vandfilm (en. Annular flow). Ved høje volumenstrømme af luft sammenlignet med vand vil væsken bevæge sig i en film langs rørvæggen, mens rørets center er domineret af luftstrømme.
- Forstøvet strømning (en. Spray flow). Øges luftstrømmen yderligere vil luftens turbulens rive vandfilmen i stykker, og væsken vil transporteres som dråber i luftfasen.

De mange fagtermer kan medføre misforståelser, eksempelvis fordi forskellige fagtermer i mange tilfælde henviser til den samme strømningstype og er ensrettet i forhold til en bestemt fagdiciplin. På figur F.2 ses en grafisk illustration af de ovenfornævnte strømningstyper.



Figur F.2. Illustration af forskellige strømningstyper i to-faset strømning af luft og vand i horisontale trykrør. [27]

De omtalte eksperimenter blev i mange tilfælde suppleret med teoretiske overvejelser og generaliseret til halvempiriske diagrammer, som indikerer strømningstypen ved en given ledningsdiameter, ledningshældning eller volumenstrøm af vand og luft. Et eksempel på et diagram for stigende trykrør ses på figur F.3.



Figur F.3. Generaliseret diagram til karakterisering af strømningstyper i stigende rør. Førsteaksen angiver luftens arealmidlede strømningshastighed mens anden-aksen angiver vandets. [51]

Ovenstående diagram kan anvendes med rimelig nøjagtighed for rørledninger med en hældning på $\pm 10^{\circ}$, hvorfor det anvendes til at estimere strømningstypen i Gerå-ledningen. Pumpen yder som nævnt cirka $30 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, hvilket svarer til en arealmidlet ledningshastighed på cirka $1,1 \text{ ms}^{-1}$. I løbet af luftindblæsningen tilføres cirka 5201 luft i ledningen, hvilket svarer til en arealmidlet hastighed på 1 ms^{-1} i pumpeledningen. Ifølge strømningstypediagrammet svarer dette til, at luften bevæger sig i slugs gennem ledningen.

F.3 Modellering af luftindblæsning

Selvom undersøgelsen af luftindblæsningen i pumpesystemerne i Gerå og Als har afsløret erfaringer om metodens anvendelsesområder er der stadig behov for øget kendskab hertil. Specielt ville muligheden for at kunne modellere luftindblæsningens effekter i nye pumpesystemer være af stor værdi, hvis luftindblæsningen skal betragtes som et værktøj til svovlbrintebekæmpelse. Den simpleste fremgangsmåde er at modellere røret ved hjælp af Saint Vennant-ligningerne og indlægge en kunstig Preissmann-spalte, hvis tykkelse afhænger af trykudbredelseshastigheden. Denne modeltype forudsætter idéel ventilation af systemet og kræver desuden smalle spalter for at opnå realistiske trykudbredelseshastigheder. Alternativet til disse modeller er den såkaldte Two-component Pressure Approach, TPA-model. Her tilføjes et ekstra trykbiddrag i Saint Vennant-ligningerne, der muliggør beskrivelse af over- og undertryk som følge af utilstrækkelig ventilation. De nævnte modeller er primært udformet for at beskrivelse overgangen fra delfyldt til fuldtløbende rør, fordi denne overgang i større drænkanaler i flere storbyer har givet anledning til rørbrud og geysere gennem ventilationsåbninger. Til beskrivelse af luftlommers transport i trykrør kan CFD-simuleringer med fordel anvendes. [52] Specielt er Volume of Fluid, VOFmodellerne, egnede til beskrivelse af transport af større luftlommer, hvor overfladespændinger er af mindre betydning. Hvis strømningerne er domineret af boble-strømninger bør i stedet anvendes en mixture model. [37]

For at forbedre forståelsen af luftens transport i ledningen i Gerå opsættes en VOF-model i STAR CCM+ fra CD-adapco. I modellen betragtes en horisontal Ø110 mm rørledning med en længde på 150 meter. Som startbetingelse er ledningens vand og luft stillestående med et statisk tryk på 5 mVs. De midterste 50 meter er fyldt med luft og i beregningen tilføres en konstant vandmængde på $8,3 \,\mathrm{ls}^{-1}$ svarende til vandføringen under normal drift i Gerå. På figur F.4 ses resultatet af simuleringen efter relativt kort tid med indpumpning af vand.



Figur F.4. Beregnede volumenfraktioner af luft ved faseovergangen opstrøms (th) og nedstrøms (tv) for luftlommen. Vandets strømningsretning er fra højre mod venstre og rød angiver en volumenfraktion af luften på én, mens blå angiver en volumenfraktion af vand på én. Øverste række viser startbetingelsen mens de to resterende rækker viser resultatet efter henholdsvist 400 ms og 800 ms.

Simuleringen viser en del af CFD-simuleringernes potentiale, idet det er muligt at beskrive

luftens transport under en pumpecyklus. Ulempen ved denne metode er, at den er forholdsvist beregningstung samt at det ikke er muligt at beskrive kombinationen af større luftlommer og luftbobler. Analysen viser CFD-simuleringernes potentiale til at øge forståelsen af de to-fasede strømninger i pumpeledningen, men anvendes af hensyn til projektets tidsmæssige rammer ikke yderligere i dette projekt.
G. Opsætning af simulering i STAR CCM+

Simulering af tredimensionelle strømninger ved hjælp af kommercielle CFD-programmer er baseret på en lang række valg og forudsætninger, der alle påvirker den numeriske models evne til at beskrive de faktiske forhold. I dette bilag præsenteres derfor den grundlæggende opsætning af modellerne til simulering af bundforskydningsspændinger i de to pumpesumpe. Der anvendes i mange tilfælde standardindstillinger, som er beskrevet i [53].

G.1 Valg af fysiske modeller

I STAR CCM+ er det muligt at tilvælge en lang række modeller, der giver en matematisk beskrivelse af forskellige fysiske fænomener. Følgende modeller er valgt i den stationære et-fasede simulering. [53]

- Vandets betragtes en usammentrykkelig Newtonisk væske og der anvendes fysiske parametre fra materialebiblioteket i STAR CCM+, som er angivet ved 20 °C.
- Strømningerne betragtes som turbulente og tredimensionelle, idet de beskrives ved hjælp af Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS-ligningerne. Alternativerne til denne metode er Large Eddy Simulation, LES, eller Direct Numerical Simulation, DNS. Sidstnævnte metode er ikke tilgængelig i STAR CCM+ og begge metoder anvendes hovedsageligt til forskningsformål på grund af deres store krav til beregningstid. [37]
- Til at modellere impulsøverførslen af hvivler mindre end beregningsnettet anvendes en SST K- ω -turbulensmodel. Denne model er en forbedret udgave af den normale K- ω -turbulensmodel, der ofte er sensitiv øverfor tilføjelsen af turbulent kinetisk energi ved randen. Valget af en K- ω -turbulensmodellen betragtes som et acceptabelt kompromis mellem nøjagtighed og beregningstid, idet de mere komplicerede Reynolds-Stress modeller er mere beregningstunge. K- ϵ -modellen har erfaringsmæssigt problemer med at beskrive områder med stor krumning af strømlinjerne, og da dette forventes at forekomme ved indløbet til sugeledningen, fravælges denne model.
- Tyngdekraften tilføjes til impulsligningens vertikale komponent, idet denne ikke som standard inkluderes i modelleringen.

G.2 Diskretisering

Diskretiseringen er en af de største kilder til numeriske fejl og konvergensproblemer i simuleringerne, og det er derfor vigtigt at generere et beregningsnet af høj kvalitet. STAR CCM+ tilbyder en række forskellige automatiske meshere, der kan inddele domænet i beregningsceller. I den stationære et-fase-simulering diskretiseres pumpesumpen ved hjælp af en polyhedral mesher, der generer et beregningsnet bestående af polyhedraler, som typisk har 14 overflader.

Beregningsnettet i Kongerslev har en maksimal størrelse på 4 cm med lokale forbedringer i sugeledningen og ved indløbet hertil. Den mindst tilladelige kvalitet af beregningsnettet af sat til 0,4. Kvalitetsindekset er et udtryk, der kombinerer cellens længde/bredde-forhold, størrelse i forhold til naboceller og skævhed til ét samlet tal mellem 0 og 1. [53] På figur G.1 ses beregningsnettet i pumpesumpen i Kongerslev og det udregnede kvalitetsindeks for hver celle. I området omkring bunden og ved sugeledningen har beregningsnettet størst mulig kvalitet mens det i områderne med lavere strømningshastighed har en lavere kvalitet. Beregningsnettet består af cirka 1,97 millioner polyhedraler.



Figur G.1. Illustration af beregningsnettet og dets kvalitetsindeks til simulering af strømningerne i pumpesumpen på Syrenvej i Kongerslev.

På figur G.2 ses beregningsnettet og dets kvalitetsindeks for Ijrras-pumpesumpen . Der anvendes en maksimal cellestørrelse på 10 cm med lokale forbedringer og en mindst tilladelig cellekvalitet på 0,4. Beregningsnettet består af cirka 8,78 millioner polyhedraler.



Figur G.2. Illustration af beregningsnettet og dets kvalitetsindeks til simulering af strømningerne i Ijrras-pumpesumpen.

Ved alle simuleringerne skal det eftervises, at løsningen er uafhængig af det valgte beregningsnet. Dette sker ved at genere et nyt og finere beregningsnet og foretage en ny simulering. Hvis resultatet er uændret er løsningen uafhængig af diskretiseringen, og den grove diskretisering kan anvendes. Dette er tilfældet i begge simuleringer, hvor beregningsnettets samlede antal celler er øget med cirka 20%. På figur G.3 ses eksempelvis bundforskydningsspændingsfordelingen for pumpesumpen i Kongerslev med et beregningsnet med henholdsvis 1,97 og 2,2 millioner



polyhedraler. Forfiningen af beregningsnettet har ikke medført en ændring i simuleringens resultat, og løsningens betragtes som uafhængig af diskretiseringen.

Figur G.3. Beregnede bundforskydningsspændinger i pumpesumpen i Kongerslev med et beregningsnet med 1,97 (tv) og 2,2 millioner (th) polyhedraler.

Langs pumpesumpens vægge vil gradienterne i hastighedsprofilet være store, og her kræves derfor en detaljeret diskretisering, idet en grov diskretisering vil underestimere gradienterne tæt ved væggen og dermed bundforskydningsspændingerne og produktionen af turbulent kinetisk energi. Hvis det turbulente og laminære grænselag skal opløses, kræves det imidlertid at turbulensmodellen også er gældende i overgangen fra turbulent til laminær. SST K- ω turbulensmodellen giver erfaringsmæssigt en acceptabel beskrivelse af grænselag, men kravene til diskretiseringen gør denne fremgangsmåde uhensigtsmæssig. Alternativt kan der indføres en særlig behandling af forskydningsspændingerne langs væggen, idet der tilpasses et logaritmisk hastighedsprofil. Denne fremgangsmåde anvendes i analyserne, idet den reducerer kravet til beregningstiden. På figur G.4 ses den beregende y^+ -værdi, der er et Reynolds-tal defineret på baggrund af friktionshastigheden og afstanden fra rørvæggen. I langt størstedelen af beregningsområdet i Ijrras-pumpesumoen er y^+ -værdi større end 60, hvilket betyder, at den nærmeste vægcelle befinder sig i udkanten af det turbulente grænselag. I pumpesumpen i Kongerslev er y^+ -værdierne lavere, hvilket betyder, at den nærmeste vægcelle er i det turbulente grænselag. [54] Vægfunktionerne i STAR CCM+ tilpasses automatisk efter y^+ -værdierne, således der anvendes forskellige hastighedsprofiler ved høje og lave y^+ -værdier.



Figur G.4. Beregnede y^+ -værdier langs pumpesumpens bund ved stationær strømning i pumpesumpen.

G.3 Valg af løsningsmetode

STAR CCM+ tilbyder en række forskellige metoder til iterativ løsning af impuls-, kontinuitets-, og turbulensligningerne. En af mulighederne er at vælge en løsningsmetode, der itererer efter en stationær løsning til det opstillede problem. Denne løsningsmetode har imidlertid vist sig at være forholdsvist afhængig af startbetingelserne, idet den foretager store ændringer mellem hver iteration. Derfor anvendes en implicit ikke-stationær løsningsmetode til at finde den stationære løsning. Denne metode giver mulighed for at justere størrelsen af tidsskridtene og dermed lempes kravene til beregningsnettet, fordi ændringerne mellem to iterationer begrænses af det valgte tidsskridt. Tidsskridtet i den implicitte ikke-stationære beregning vælges, så det konvektive Courant-tal i alle celler til alle tidspunkter er mindre end én. I starten af beregningen betyder det, at tidsskridtet er 0,001 s. I takt med at løsningen nærmer sig en stationær tilstand kan tidsskridtet øges til 0,01 s. En af de store udfordringer ved CFD-simuleringer er at bestemme, om en løsning har konvergeret. Ofte anvendes skalerede residualer fra iterationerne af bevarelsesligningerne som mål for konvergens. I projektet betragtes en løsning som konvergeret, når alle de skalerede residualer er mindre end 10^{-7} . Residualerne er skalerede i forhold til residualerne i de første fem iterationer og dermed afhængige af startgættet. [53] Derfor overvåges desuden systemets overordnede massebalance og det samlede tryktab fra indløb til udløb. Denne fremgangsmåde er anbefalet i [54].

G.4 Rand- og begyndelsesbetingelser

Rand- og begyndelsesbetingelser er en nødvendighed for at kunne løse bevarelsesligningerne, idet de indeholder informationer om modelområdets interaktion med den omkringliggende verden. Principielt er en begyndelsesbetingelse ikke nødvendig i en stationær beregning, men et kvalificeret startgæt kan forkorte beregningstiden og øge sandsynligheden for konvergens. Derudover kræver den implicitte ikke-stationær løsningsmetode en begyndelsesbetingelse. Derfor initialiseres vandfasen at være stillestående med et trykniveau svarende til atmosfæretryk ved den friktionsløse væg ved pumpesumpens stopniveau. Strømningerne i pumpesumpen drives primært af pumpehjulets rotation, der fortrænger væske fra pumpehuset og dermed transporterer ny væske fra pumpesumpen gennem sugeledningen til pumpehjulet. Hastighedsprofilet ved indløbsflangen til pumpen er som udgangspunkt ukendt, idet dette er påvirket af væskens historik opstrøms for pumpen. For ikke at lægge restriktioner på hastighedsprofilet fastlægges udløbet derfor som en konstant trykrand. Af hensyn til konvergens fastlægges indløbet som en konstant massestrøm, idet kombinationen af en tryk- og hastighedsrand erfaringsmæssigt giver størst sandsynlighed for konvergens. Da væsken er usammentrykkelig og vandoverfladen er fastholdt vil en fastholdt massestrøm i udløbet og en konstant trykrand i indløbet give identiske resultater. Pumpesumpens vægge betragtes som hydraulisk ru med en ækvivalent sandruhed på 0,5 mm. I simuleringerne anvendes en ruhedsbegrænser, der automatisk anvender udtrykkene for hydraulisk glatte vægge, hvis strømningen er glat. [53]