

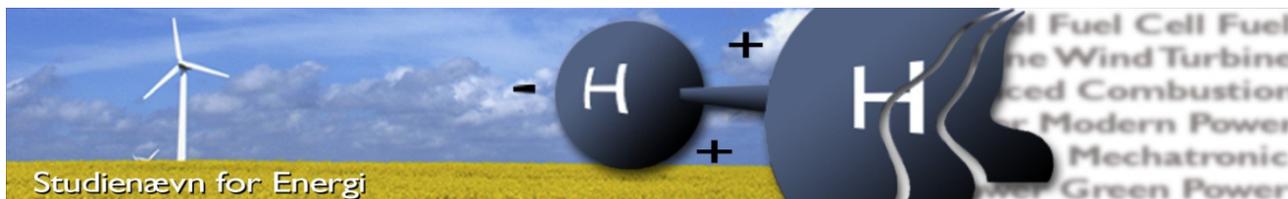


## Opstartsregulering af pumper

Pia Christina Kiersgaard i samarbejde med Aalborg Forsyning, Varme

Energiteknik, Aalborg Universitet





<b>Titel:</b>	<b>Opstartsregulering af pumper</b>
<b>Semester:</b>	<b>7. semester</b>
<b>Semester tema:</b>	<b>Bachelorprojekt</b>
<b>Projektperiode:</b>	<b>10. august – 16. oktober 2014</b>
<b>ECTS:</b>	<b>18</b>
<b>Vejleder:</b>	<b>Søren Juhl Andreasen</b>
<b>Projektgruppe:</b>	<b>MCE7-722</b>

---

[Pia Christina Kiersgaard]

Oplag:	4 stk.
Antal sider:	65 sider
Appendiks:	0
Bilag:	0

**SYNOPSIS:** Der er udarbejdet en model for fjernvarmepumperne påsat returløbet på Vangen Pumpestation. På denne model er der udarbejdet open-loop-regulering med et rampe-input og med en Signal Builder som input. Den sidstnævnte opfylder designkriterierne. Kriterierne er, at risetime skal være 135 s. og overshoot må ikke overstige 5 %.

Dernæst er der udarbejdet closed-loop-regulering i form af en PI-regulator. Denne er imidlertid for hurtig.

Den bedste reguleringsstrategi er open-loop-regulering med input fra en Signal Builder, men denne er ikke direkte implementerbar hos Aalborg, Forsyning, Varme.

Aalborg Forsyning, Varme ønsker en løsning med en PI-regulator, men denne løsning kræver forbedringer. Der er her indsat en rampebegrænsning, men i dette specielle tilfælde, gør den systemet hurtigere. Der er derfor fortsat behov for forbedringer, hvis løsningen skal være en PI-regulator.

Ved at underskrive dette dokument bekræfter hvert enkelt gruppemedlem, at alle har deltaget ligeligt i projektarbejdet og at alle er kollektivt ansvarlige for rapportens indhold. Endvidere hæfter alle gruppemedlemmer for at plagiering ikke forefindes i rapporten.



## Forord

Denne rapport er udarbejdet som et led i uddannelsen som diplomingeniør i Energiteknik med speciale i regulering af mekatroniske systemer hos Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet på 7. semester.

## En speciel tak

En speciel tak skal lyde til Kjeld Sommer Knudsen fra Aalborg Forsyning, Varme, Produktionsafsnittet for hans altid velvillige hjælpsomhed – specielt i forbindelse med udarbejdelse af forsøg samt med at hente rådata ud af systemet efter forsøgene.

Derudover skal Bjarne Holm fra Aalborg Forsyning, Varme have en varm tak for sin bistand med teknisk information samt gennemgang af rapporten.

## Læsevejledning

Denne rapport er opbygget på følgende måde. Først en indledning, der beskriver fjernvarmes berettigelse i samfundet. Dernæst kommer en problemanalyse med beskrivelse i variationerne i fjernvarmesystemet samt en beskrivelse af de enkelte parametre, afsluttende med en kort beskrivelse af trykstød, der giver støjgener hos forbrugerne.

Dette leder direkte til problemformuleringen: Hvorledes kan en reguleringsstrategi udarbejdes, og hvorledes kan den se ud, når dens formål er at eliminere lydgener hos fjernvarmekunderne som følge af trykbølger i rørene som følge af opstart af pumperne?

I problemløsningen er der udarbejdet en model på baggrund af en forsøgsmåling. Modellen fører til open-loop-regulering og closed-loop-regulering. I diskussionen bliver det tydeligt, at den bedste strategi er open-loop-regulering med Signal Builder, men denne er ikke direkte implementerbar hos Aalborg Forsyning, Varme.

Undervejs er litteraturhenvisninger markeret med en parentes. I parentes står forfatter, årstal. F.eks. (energinet.dk, 2014).

Der er vedlagt en CD. Denne indeholder rapporten, MatLab-filerne og PDF-kopier af reference-hjemmesiderne.

Gengivelse af denne rapport eller dele deraf er kun tilladt med forfatterens forudgående accept og med reference hertil.



## Summary

This report is structured as follows. First, there is an introduction that describes the district heating legitimacy in the community. Next comes the problem analysis describing the variations of the district heating system and a description of the individual parameters, finishing with a short description of the water hammer that provide noise nuisance for consumers.

This leads to the problem statement: How can a control strategy be developed and how does it look when its purpose is to eliminate the noise pollution by homeowners as a result of water hammer in the pipes due to the start-up of the pumps?

In problem solving, a model based on an experimental measurement is developed.

This yield:

$$e(t) = 10 * e^{-t}$$

The model leads to the open-loop control and closed-loop control.

Two open-loop control strategies are developed. The best is the one with input from a Signal Builder. This regulatory approach meets both design criteria, namely that the rise time must be 135 s, and the overshoot should not exceed 5%. In addition, a closed-loop control strategy is developed. This fitted PI controller does not meet the design criteria with a rise time of 135 s. The Discussion seeks to optimize the model with PI controller by inserting a ramp limitation in two different locations in the model. But contrary to expectation ramp limitation tends to make the system faster.

In the discussion it becomes clear that the best strategy is open-loop control with Signal Builder, but this is not directly implementable at Aalborg Supply, Heating. It would therefore be interesting in cooperation with Aalborg Supply, Heat to find a way to implement an input equivalent to that provided by the Signal Builder.



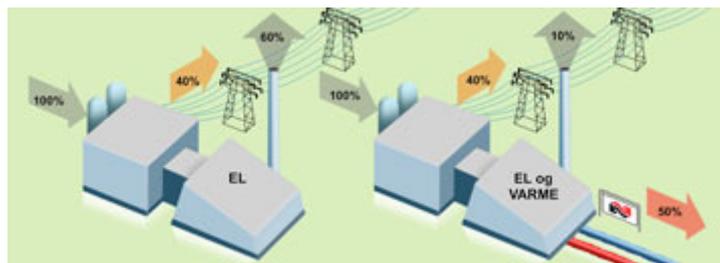
## Indholdsfortegnelse

Forord .....	5
En speciel tak .....	5
Læsevejledning .....	5
Summary .....	7
Indledning .....	11
Problemanalyse .....	15
Pumpetyper .....	23
Fortrængningspumper .....	23
Strømningspumper .....	25
Tab i rør, fittings og ventiler .....	27
Rør .....	27
Fittings .....	27
Ventiler .....	28
Trykstød .....	29
Problemformulering .....	31
Beskrivelse af projektet .....	31
Problemafgrænsning .....	32
Problemløsning .....	33
Model .....	34
Reguleringsstrategi .....	44
Regulering .....	50
Diskussion af Resultater .....	57
Konklusion .....	61
Perspektivering .....	63
Bibliografi .....	65



## Indledning

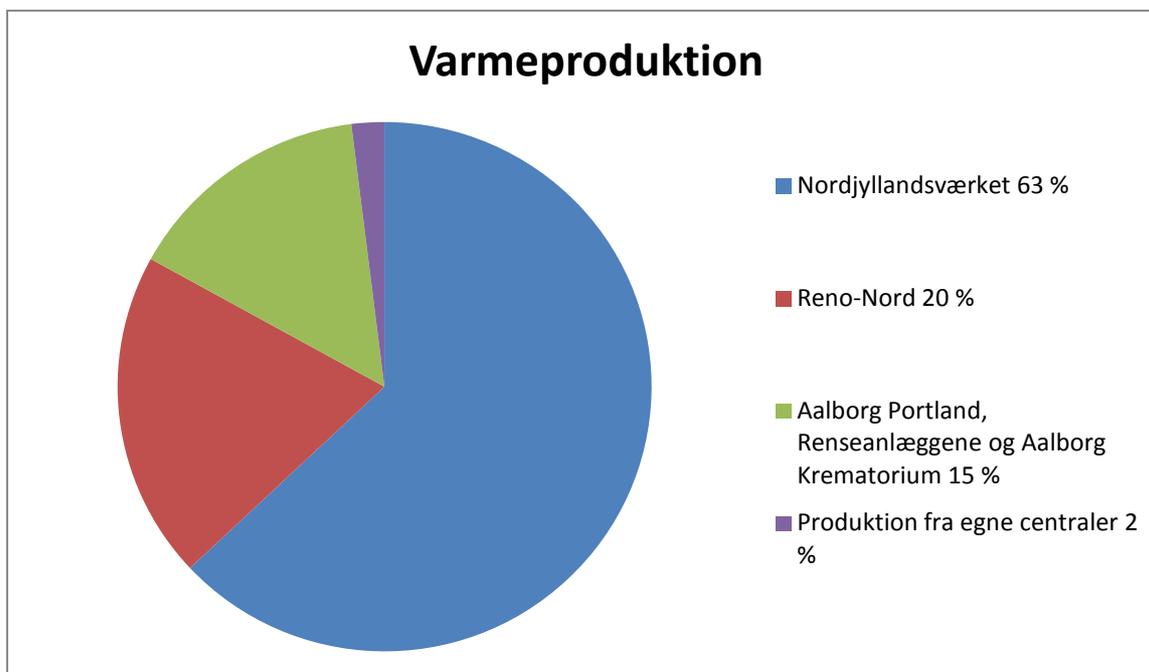
Af de danske husstande er 63 % forsynet med fjernvarme. (Fjernvarme, 2011) Dette leveres af 460 fjernvarmeværker, der anvender 60.000 km rør til at distribuere varmen. Oprindeligt var fjernvarme et spildprodukt. Ved produktion af el opstår der varme, denne skal køles bort. Det er denne overskudsvarme, der udnyttes til fjernvarme. Ved ren elproduktion udnyttes ca. 40 % af energien, mens der udnyttes ca. 90 % af energien, når spildvarmen anvendes til fjernvarme. Dette fremkommer af, at 40 % fortsat udnyttes til el, mens 50 % udnyttes til varme. Dette er forsøgt i illustreret på Figur 1.



Figur 1 viser udnyttelsesgraden for henholdsvis kraftværk og kraftvarmeværk (Kraftværk contra kraftvarmeværk: fjernvarme, 2011)

Det har ændret sig over tid. Det skyldes til dels, at der ikke produceres el udelukkende på kraftvarmeværker, men af alternative vedvarende kilder som vind og sol. Når el produceres på denne måde, opstår der ikke den samme mængde overskudsvarme. Da 80 % af fjernvarmeproduktionen er overskudsvarme fra produktion af el, har fjernvarmeværkerne været nødsaget til selv at producere eller købe de sidste 20 % varme.

Hos Aalborg Forsyning, Varme er fordelingen for eksempel således:



Figur 2 viser fordelingen af varmeproduktion (Aalborg Forsyning, Varme, 2014)

Som det fremgår af Figur 2 er det 63 % af varmen i Aalborg, der produceres som kraftvarme på Nordjyllandsværket. 35 % af varmen er overskudsvarme fra forbrænding af affald (Reno-Nord), produktion af cement (Aalborg Portland) og ligbrænding (Krematoriet), men de sidste 2 % er varmeproduktion på egne gas- eller oliekedler. (Aalborg Forsyning, Varme)

Andre steder i landet, hvor der ikke er så store og oplagte muligheder for at udnytte spildvarme, er andre teknologier taget i brug. Det er blandt andet varmepumper, el-kedler, solvarme, geotermi og kedler, der brænder forskellige bio-brændsler af.

Fordelingen af brændsels- og energikilder til produktion af fjernvarme på landsplan ser således ud:

Fjernvarmens energikilder	Procentvis fordeling
Biobrændsel	40,98 %
Brændbart affald	7,77 %
Fossile brændsler	47,75 %
Sol, geotermi og vind	1,48 %
Biolie og biogas	2,02 %

Tabel 1 viser fordelingen af brændsels- og energikilder til produktion af fjernvarme (Fjernvarme, 2011)



Figur 3 viser fordelingen af brændsels- og energikilder til produktion af fjernvarme (Fjernvarme, 2011)

Det fremgår af Tabel 1 og Figur 3, at biolie, biogas, sol, geotermi, vind og biobrændsel udgør 44,48 % af de energikilder, der anvendes til at producere fjernvarme i Danmark. Dertil kan lægges de 7,77 %, der er overskudsvarme fra forbrænding af affald. Til sammen udgør det 52,25 %. Det ses også, at fossile brændsler udgør lidt under halvdelen. Det er imidlertid ikke kun de fossile brændsler, der kan anvendes til kraftvarme. 18 % af brændselsforbruget til kraftværkerne kom i 2013 fra biobrændsler. Det forventes, at dette stiger til 54 % i 2023. (Energinet.dk, 2014)

Der er politisk vilje og opbakning til at fremme fjernvarmen i Danmark. Dette skyldes, at fjernvarmen underligger politisk styring og regulering. Men det skyldes i høj grad også, at fjernvarme er miljørigtig sammenlignet med individuelle opvarmningsformer som oliefyr. Så sent som i maj 2014 har Energistyrelsen offentliggjort en analyse, der angiver, at 50% af den danske varmeforsyning i dag er fjernvarme, men at det samfundsøkonomisk vil være gavnligt, at denne andel kommer op på 62%. (Dansk Fjernvarme, 2014) I samme pressemeddelelse står: "Energistyrelsens samlede konklusion for hele energiområdet er, at det er teknisk muligt at omstille det samlede energisystem til at være fossilfrit. Og det endda til en meget lav pris ifølge klima-, energi og bygningsminister Rasmus Helveg Petersen." (Dansk Fjernvarme, 2014)

Der er, som ovenfor beskrevet, en igangværende udvikling indenfor fjernvarmeområdet i Danmark. Udviklingen skal fremadrettet ske på andelen af fjernvarme, der skal udvides fra de nuværende 50 % til 62

%, og på brændsels- og energikilderne, der skal bevæge sig endnu mere væk fra fossile brændsler. Denne udvikling gør, at det er interessant at videreudvikle på fjernvarme. Ved videreudvikling kan der fokuseres på nytænkning f.eks. i nye alternative opvarmningsformer, nye måder at lagre varmen på eller nye måder at transportere varmen på. Der kan tillige optimeres på nuværende teknologi. En optimering kunne være eliminering af støjgener hos forbrugerne forårsaget af opstart af pumper.

Denne støj kan opstå som følge af trykbølger, der transporteres igennem vandet, og disse trykbølger forårsager bankelyde hos forbrugeren. Trykbølgerne kan opstå, når pumper opstartes, hvis det ikke lykkes at opstarte dem på det helt rigtige tidspunkt, eller hvis det ikke lykkes at lukke ventilen på det helt rigtige tidspunkt. Derfor er det interessant at udarbejde en reguleringsstrategi, der kan sikre, at pumperne kan opstartes uden disse lydgener hos forbrugerne.

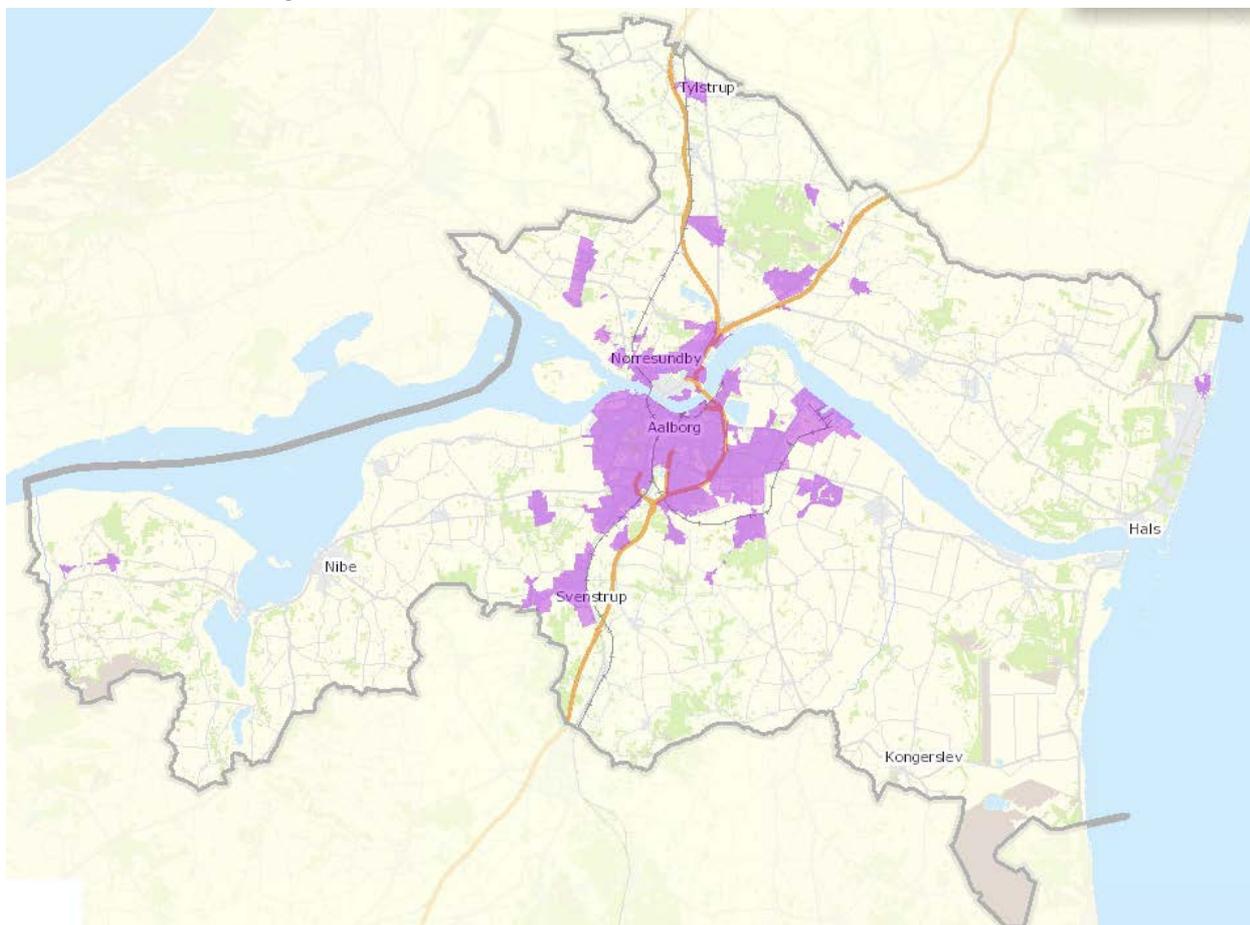
Det er lykket at få et samarbejde med Aalborg Forsyning, Varme om denne problematik.



## Problemanalyse

Aalborg Forsyning, Varme er en virksomhed, der beskæftiger 85 medarbejdere, med en årlig omsætning på ca. 700 millioner kr.

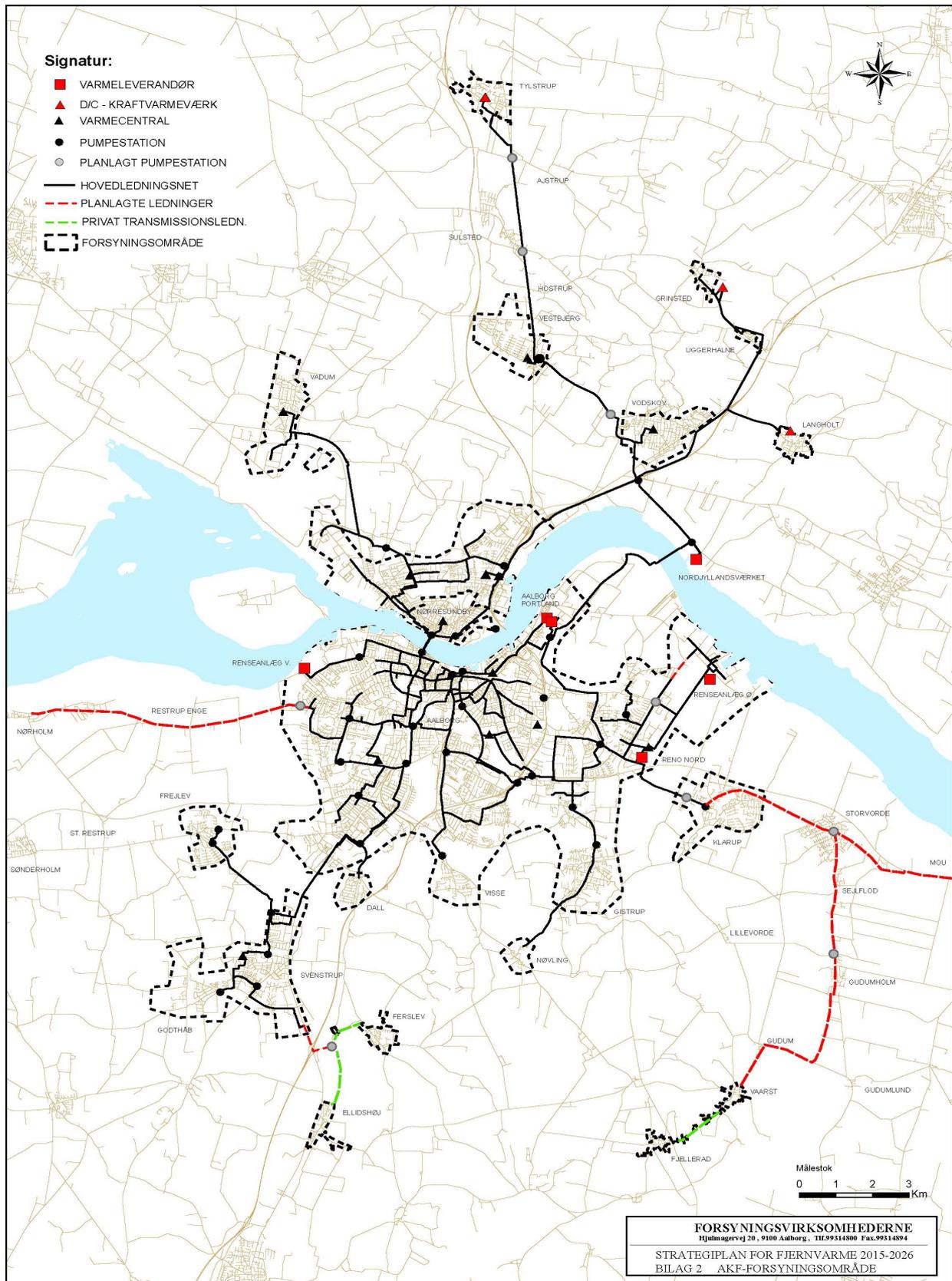
De leverer varme til 98,5 % af forbrugerne i forsyningsområdet, som er de lilla områder på Figur 4. Dette svarer til 33.265 forbrugere.



Figur 4 viser forsyningsområdet for Aalborg Forsyning, Varme (Aalborg Forsyning, Varme, 2014)

For at kunne levere varme i forsyningsområdet er der udviklet logistik. I Aalborg er det valgt, at den store transmissionsledning er nærmest cirkulær. Fra transmissionsledningen udgår mindre ledninger med det formål at forsyne delområder af forskellige størrelse med varme.

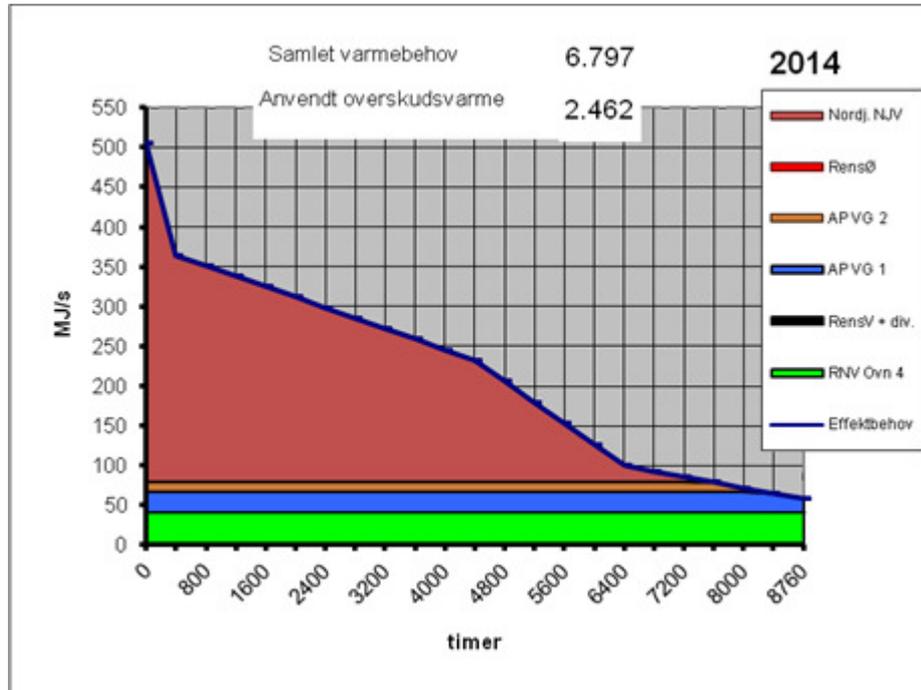
På Figur 5 ses det overordnede fjernvarmenet i Aalborg. Nettet er de fuldt optrukne linjer, der løber ud til de enkelte forsyningsområder, markeret med stiplede linjer. Varmeleverandørerne er markeret med røde firkanter, mens de røde trekantede viser decentrale kraftvarmeværker. (Aalborg Forsyning, Varme, 2014) På det overordnede net er ligeledes angivet et antal pumpestationer, markeret med en sort fyldt cirkel.



Figur 5 viser fjernvarmenettet med hovedledninger, varmeleverandøren og pumpestationer (Aalborg Forsyning, Varme, 2014)

Som det fremgår af Figur 5, varierer delområdernes størrelse. Dette medfører, at flowet i de forskellige delområder varierer. Flowet er størst i det centrale område, men også her varierer det. Varighedskurven viser, hvor meget varmebehovet og dermed flowet varierer over et år, se Figur 6.

Flowet vil ændre sig, når forbruget ændrer sig. På figuren herunder ses varighedskurven for Aalborg Forsyning, Varme. Den viser, at varmebehovet varierer fra ca. 500 MJ/s til ca. 60 MJ/s.



Figur 6 viser varighedskurven for Aalborg Forsyning, Varme (Aalborg Forsyning, Varme, 2014)

Når energibehovet ændrer sig, ændrer flowet sig også. Da temperaturen på fremløbet ændres fra 75 °C om sommeren til 90 °C om vinteren, og følgende formel gælder (Holm, 2014):

$$Q = \frac{P}{\Delta T * c * \rho}$$

Hvor

Q er flow [m<sup>3</sup>/h]

P er effekt [MJ/s]

ΔT er temperaturdifference [°C]

C er varmekapacitet, der for fjernvarmevand er

$$c = 4,185 \left[ \frac{kJ}{kg * K} \right]$$

ρ er massefylden, der for fjernvarmevand er

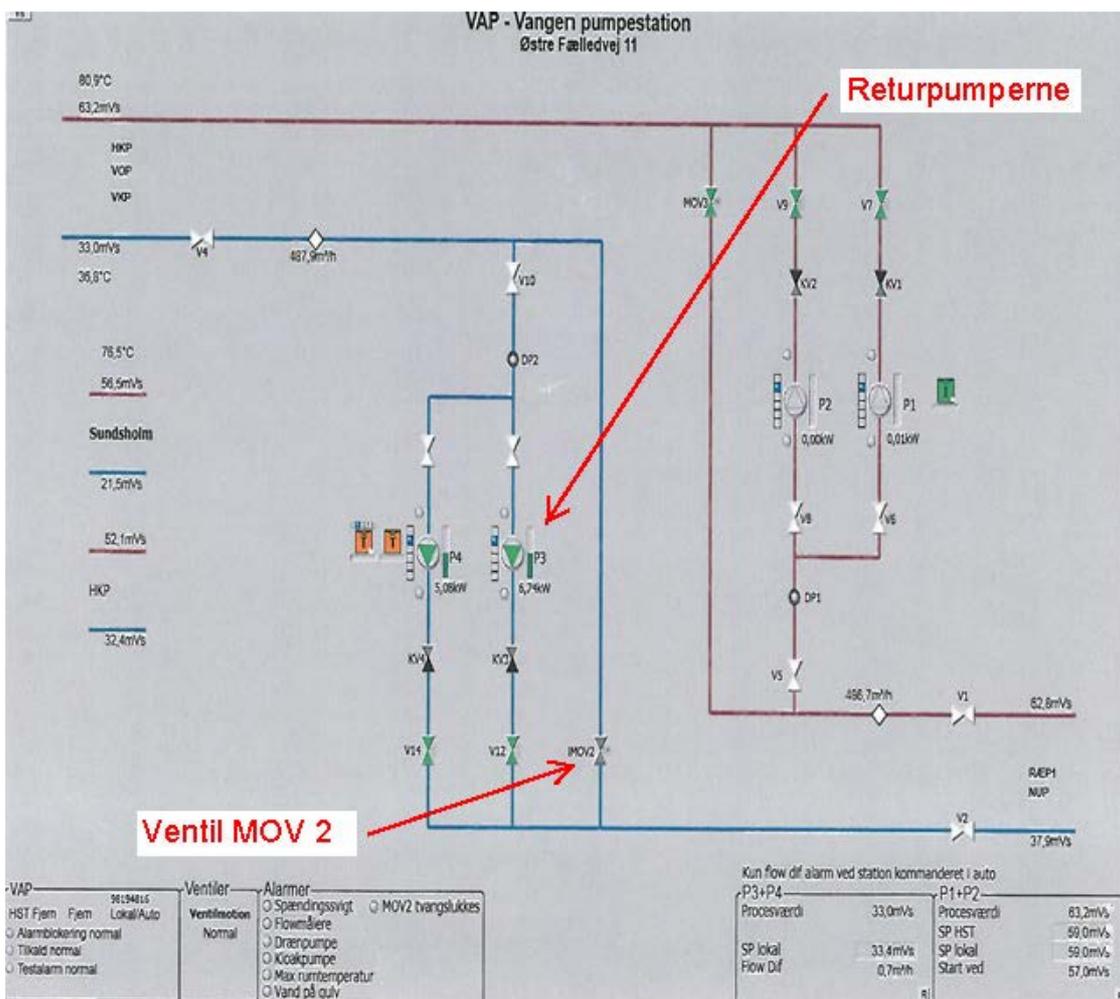
$$\rho = 983,2 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

Så varierer flowet fra 1499,8 m<sup>3</sup>/h til 8748,9 m<sup>3</sup>/h. Dette gælder imidlertid for hele det centrale område. I de enkelte delområder vil flowet være lavere. For et lille delområde med lavt forbrug kan flowet være under 10 m<sup>3</sup>/h. Der er en del variationer på temperatur, tryk og flow. Trykket varierer fra 6,5 bar til ca. 2,5 bar alt afhængig af afstanden til den nærmeste pumpestation. (Holm, 2014)

Medvirkende til denne variation er de mange ledninger. Ledningsnettet består af ca. 1422 km dobbeltledning. Derudover indvirker pumperne. Ca. 65 pumpestationer pumper vandet rundt i systemet.

Et eksempel på en pumpestation kunne være Vangen Pumpestation, som er den pumpestation, hvor forsøgsdata er indhentet fra.

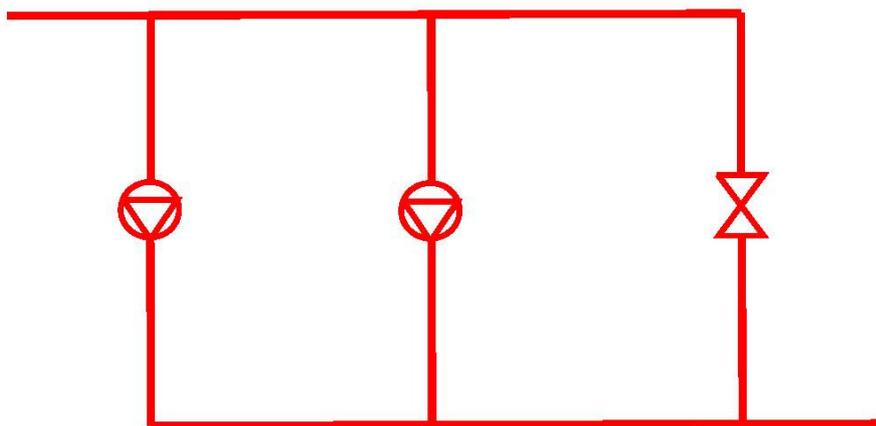
På Figur 7, der er fra Aalborg Forsyning, Varmes SRO, er returpumperne og den ventil, der sidder parallelt med pumperne markeret med røde pile. Vangen Pumpestation er reelt set opbygget som vist på Figur 7, men der fokuseres udelukkende på returløbet i dette projekt.



Figur 7 viser et udskrift fra SRO'en på Vangen Pumpestation (Udskrift fra SRO, 2014)

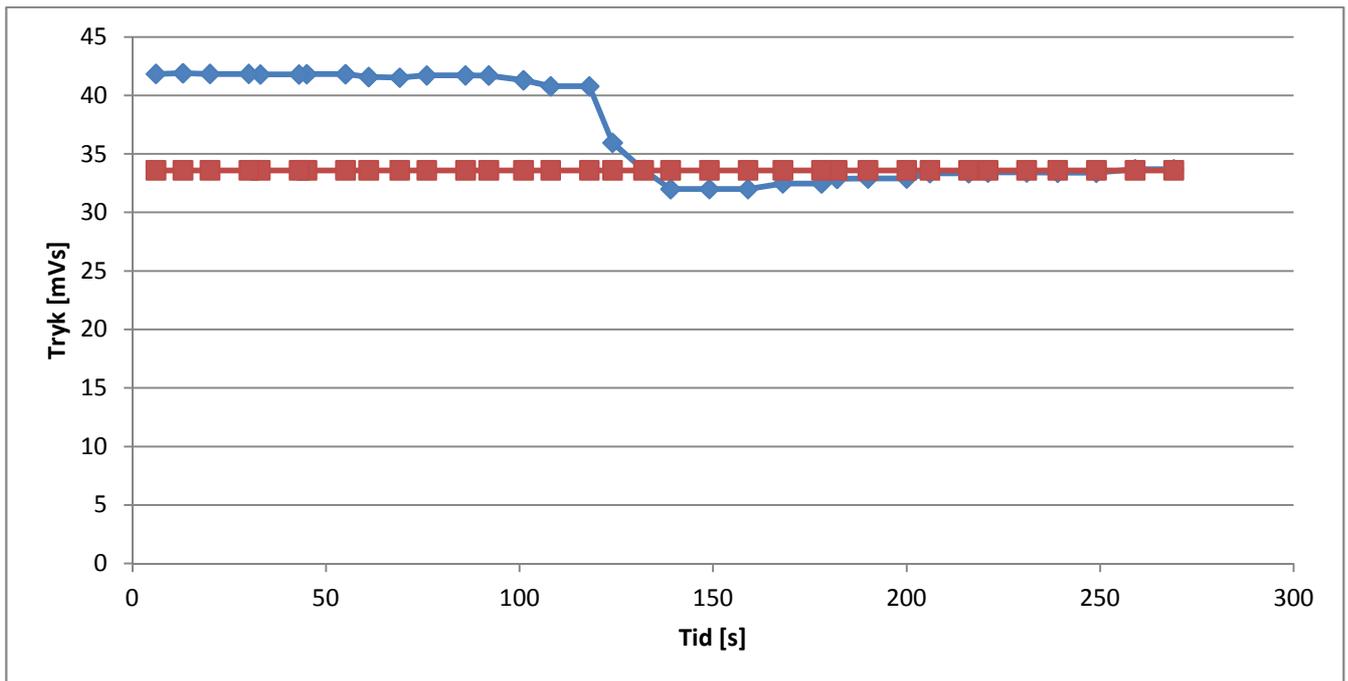
På Figur 8 er returløbet tegnet i en meget simplificeret udgave. Den er opbygget, som det ses på Figur 8, med tre parallelle rør. På de to rør sidder en pumpe. På det tredje rør sidder en ventil.

Figur 8 illustrerer udelukkende returløbet, da det er disse pumper, der arbejdes videre med i forsøget.



Figur 8 viser en simplificeret skitse af returløbet på Vangen Pumpestation

Som det fremgår af Figur 7 og Figur 8, sidder der to pumper parallelt. Disse to pumper er igen parallelle med en ventil. Alle pumper på alle pumpestationer kører ikke hele tiden. Dette er for at opnå at pumperne kan køre indenfor deres optimale arbejds punkter. Imidlertid er alle parallelle pumper koblet sammen, således at de altid vil køre samtidigt og med samme omdrejningshastighed. Når der har været en periode, hvor det ikke har været nødvendigt at køre med pumperne, er disse stoppet og vandet har passeret igennem røret med ventilen. Hvis forbruget efterfølgende stiger, for eksempel fordi det er morgen og mange forbrugere tager bad samtidigt, stiger flowet, og dette medfører, at pumperne på pumpestationerne før og efter den pågældende pumpestation nærmer sig deres maksimale ydeevne. I denne situation skal pumperne på den pågældende pumpestation opstarte for at hjælpe med at sikre det nødvendige flow og tryk. For at imødekomme dette skal ventilen lukke samtidig med, at pumperne opstartes. Hvis det ikke lykkes at gøre dette optimalt, vil pumperne levere et overshoot af tryk, som det er illustreret på Figur 9.



Figur 9 viser et overshoot ved opstart af pumper

Den røde linje viser setpunktet for trykket, mens den blå viser en måling af trykket ved opstart af pumperne. Her ses det, at den blå linje dykker ned under den røde, inden den finder på plads på det samme niveau som den røde. Det her viste overshoot er meget lille og giver næsten ingen lydgener i forbindelse med trykstød. Havde forbruget været større havde det viste overshoot også været større. Tilsvarende ville et mindre forbrug have vist et mindre overshoot eller slet ingen overshoot.

Disse overshoots af tryk vil afstedkomme trykbølger i fjernvarmerørerne. Disse trykbølger vil forplante sig med vandet rundt i systemet, og vil således også passere ude hos forbrugerne. Hos de enkelte forbrugere, der stadig får fjernvarme direkte ind i deres radiatorer, vil disse trykbølger give lydgener direkte hos forbrugerne, men det vil også give lydgener hos nyere forbrugere, fordi deres ventiler vil stå og slå til og fra. Disse ventiler sidder som oftest inde i bryggerset hos forbrugeren og er en del af koblingen imellem fjernvarmenettet og forbrugers eget varmenet.

På Figur 10 ses et eksempel på, hvordan enheden, der sidder hjemme hos forbrugeren ser ud:

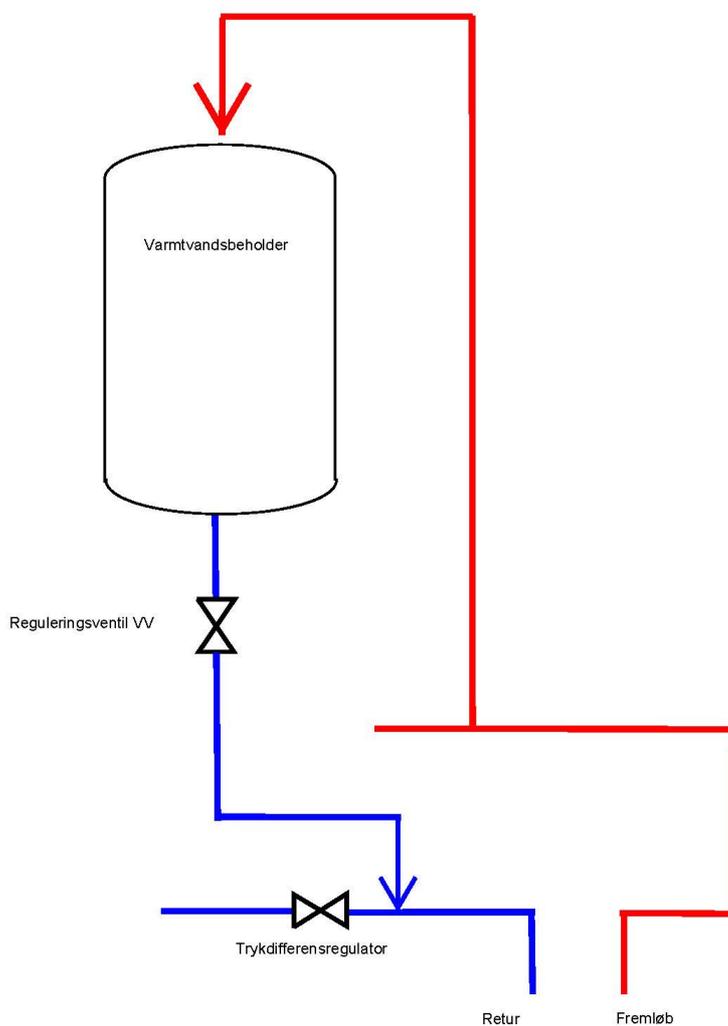
## Eksempel på opbygning af fordeleranlæg, nybyggeri



Figur 10 viser et billede af fjernvarmeinstallationen i et nybyggeri (Holm, 2014)

På Figur 10 ses et eksempel på opbygningen af et fordeleranlæg i et nybygget hus. Det interessante ses bagerst på billedet. Der kommer to rør op fra gulvet, som er sorte på grund den valgte isolering af rørene. Det højre rør er fremløbet. Dette går næsten direkte op i måleren. Det venstre er returløbet.

På Figur 11 ses en principskitse af installationen hos forbrugeren. Det ses, at fremløbet er rødt og returløbet er blåt.



Figur 11 viser en principskitse af fjernvarmeinstallationen hos forbrugeren

På Figur 11 er varmtvandsreguleringsventilen tegnet ind umiddelbart efter varmtvandsbeholderen. Trykdifferensregulatoren er på denne skitse placeret på returløbet. Trykdifferensregulatoren regulerer pumpetrykket til et brugbart drivtryk, der gerne skal være konstant for at anlægget hos forbrugeren skal køre optimalt. Det er disse to ventiler, der kan give støjgenerne hos forbrugeren.

En måde til at undgå disse gener kunne være at udarbejde en reguleringsstrategi til opstartning af pumperne, således at der ikke opstår store udsving i trykket fra værket.

## Pumpetyper

Hele afsnittet er baseret på (m.fl., 2007)

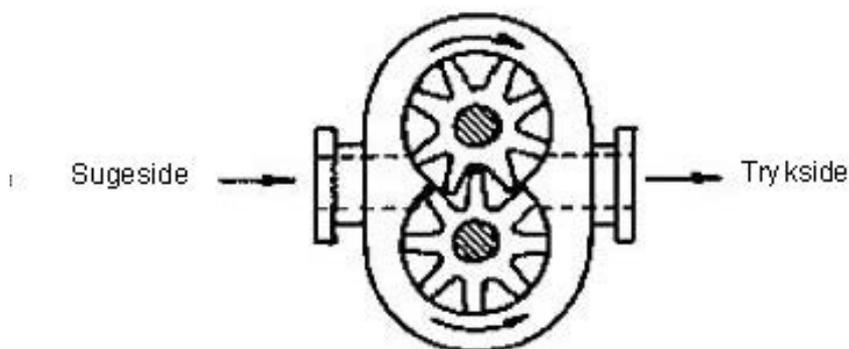
For at forstå systemet, hvilket er nødvendigt for at kunne udarbejde en reguleringsstrategi, vil de forskellige elementer kort blive beskrevet i det følgende. Først beskrives pumperne. Der kan anvendes to forskellige principper til at pumpe væske fra et sted til et andet. Det ene princip kaldes fortrængning og det andet kaldes strømning.

### Fortrængningspumper

For at kunne se forskellen beskrives en fortrængningspumpe først. Når der pumpes efter fortrængningsprincippet anvendes fortrængningspumper også kaldet positive pumper. Funktionen kan kort beskrives som: Den væske, der kommer ind i pumpen fortrænges af et stempel eller et roterende legeme. Det er vigtigt for fortrængningspumpen, at den kan komme af med vandet igen. Hvis den ikke kan komme af med vandet, stiger trykket i pumpen. Dette tryk kan blive så stort, at pumpen eller andet i rørsystemet ødelægges.

Eksempler på fortrængningspumper:

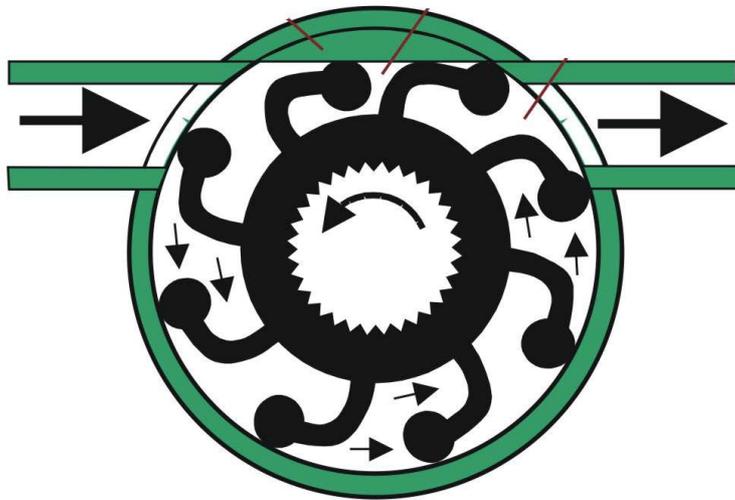
Tandhjulspumpe, der fungerer med to tandhjul, der griber ind i hinanden. Væsken transporteres mellem pumpehuset og tandhjulene. Dette fremgår tydeligt af Figur 12.



Figur 12 viser en principskitse for en tandhjulspumpe (m.fl., 2007)

Tandhjulspumpen anvendes som smøreoliepumpe og hydraulikpumpe.

Impellerpumpe, der flytter væsken med impeller, der er fremstillet af et fleksibelt materiale (f.eks. neopren). Som det fremgår af Figur 13 er impelleren placeret asymmetrisk eller der er udarbejdet et pumpehus, der ikke er helt rundt.



Figur 13 viser en principskitse for en impellerpumpe (fmlid, 2014)

En impellerpumpe skal køre med væskegennemstrømning, da impeleren er afhængig af væsken for at blive smurt og dermed være bøjelig og eftergivelig. Impellerpumper kan anvendes som kølevandspumper.

Stempelpumper, der flytter væsken ved hjælp af et stempel. Som det fremgår af Figur 14, fungerer stempelpumpen således: Når stemplet (3) bevæges op, dannes der et undertryk, så lukker trykventilen (2) og sugeventilen (1) åbner. Derved suges der væske ind i pumpehuset. Når stemplet har bevæget sig hele vejen til toppen af pumpehuset, lukker sugeventilen (1) og trykventilen (3) åbnes. Hvorved væsken presses ud, når stemplet bevæger sig ned igen.



Figur 14 viser en principskitse for en enkelt og en dobbelt stempelpumpe (m.fl., 2007)

Som det fremgår af Figur 14 forefindes der også dobbelte stempelpumper. Stempelpumper kan anvendes som lænsepumper.

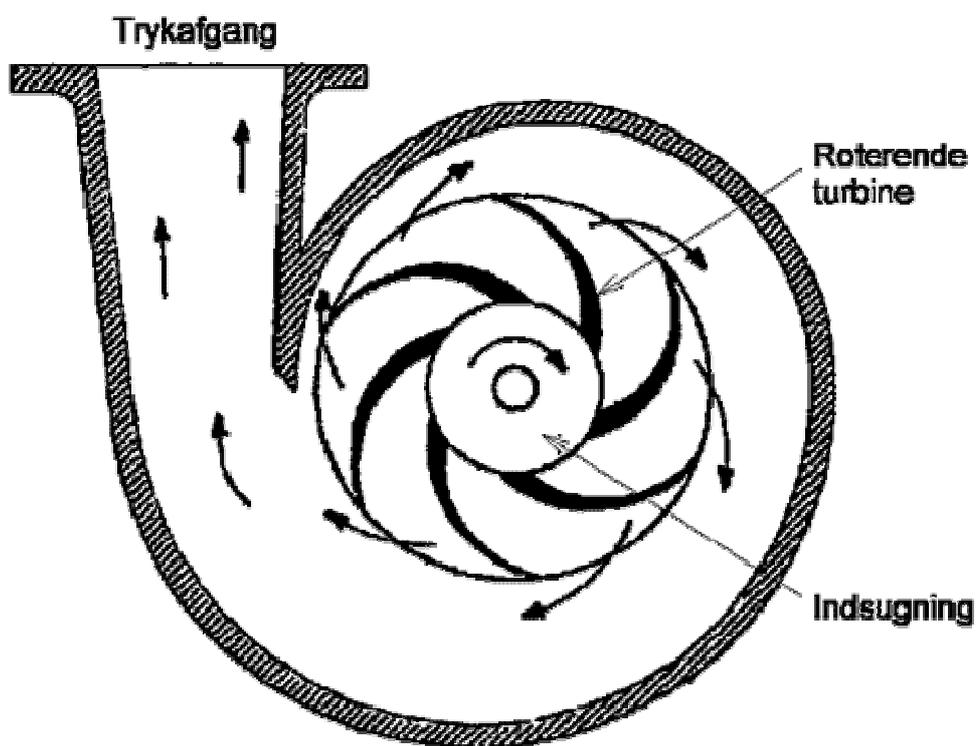
Membranpumpe, der stort set fungerer som stempelpumper, men med en membran frem for et stempel. Membranpumper anvendes som kølevands- eller lænsepumper.

## Strømningspumper

Strømningspumpe, der flytter væske ved hjælp af en rotor, propel eller ved et strømmende middel. Fordelen ved denne type pumpe er, at den ikke er så afhængig af, at kunne komme af med trykket – og den tager heller ikke skade af at køre tør.

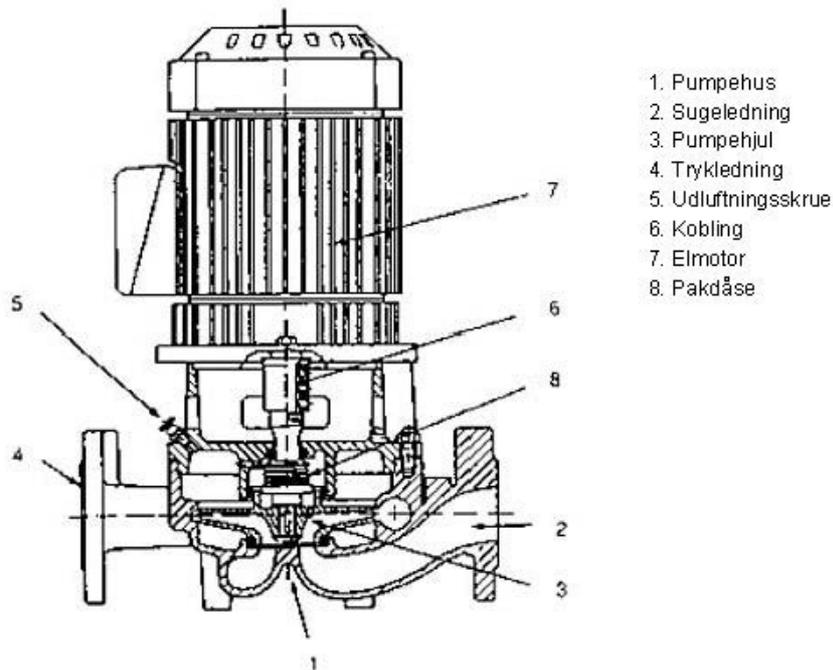
Eksempel på strømningspumper:

Centrifugalpumpe, der arbejder efter centrifugalprincippet. Som det fremgår af Figur 15 sidder indsugningen i midten af pumpehuset. Væsken bliver transporteret herfra via en roterende turbine i dette eksempel. Centrifugalprincippet bevirker, at væsken slynges ud mod pumpehusets sider og ud igennem udsugningssiden.



Figur 15 viser en principskitse for en centrifugalpumpe (Miljøstyrelsen, 1998-2011)

Figur 16 viser en centrifugalpumpe opsat. Nederst markeret med 1 ses pumpehuset. 2 viser hen til indsugningen, mens 4 viser trykledningen. Ovenpå pumpen er fastmonteret en elmotor, denne er markeret med 7. Som det fremgår af forsiden er opsætningen fuldstændig magen til opsætningen på Vangen Pumpestation.



Figur 16 viser en principskitse for en opsat centrifugalpumpe (m.fl., 2007)

Kavitation kan være et problem med en centrifugalpumpe. Det opstår, hvis der er for lavt tryk på sugesiden, da det vil forårsage at væsken fordamper. Disse dampbobler ødelægger pumpen. Dette kaldes kavitation.

Der kan også opstå kavitation i en ventil. Når væske skal passere en ventil, vil hastigheden stige, men falde igen når væsken har passeret ventilen. Trykket vil derimod falde ved passagen. Hvis trykket falder til under det absolutte damptryk, så vil væsken koge, og der dannes dampbobler. Når trykket efterfølgende stiger igen vil boblerne implodere. Disse implosioner ødelægger ventilen. Det kaldes også kavitation.

Det er centrifugalpumper, der anvendes til at pumpe fjernvarmevandet rundt i ledningsnettet os Aalborg Forsyning, Varme.

For pumper gælder (Andersen & Hansen, 2007):

$$P = Q * p$$

Hvor

P er effekten, som pumpen leverer til fjernvarmevandet [W]

Q er flow [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

p er trykket [Pa]

## Tab i rør, fittings og ventiler

Centrifugalpumpen er forbundet med resten af fjernvarmenettet af rør. Følgende opstilles ligningerne for tab i rør for at illustrere, at det er teoretisk muligt at beregne disse tab. Hele afsnittet er baseret på (Andersen & Hansen, 2007) og (Holm, 2014).

### Rør

Energิตabet over en rørstrækning kan beregnes som tryktabet. Hertil kan Darcy's ligning anvendes:

$$\Delta p = \lambda * \frac{L}{D(\text{rør})} * \rho * \frac{V^2}{2}$$

Hvor

$\Delta p$  er tryktabet i røret [Pa]

Lambda er dimensionsløs gnidningsmodstand [\*]

L er længden af røret [m]

$D(\text{rør})$  er rørets indre diameter [m]

$\rho$  er densiteten af fjernvarmevandet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

V er fjernvarmevandets hastighed [m/s]

### Fittings

Tilsvarende gælder for fittings:

$$\Delta p = \zeta * \frac{\rho}{2} * V^2$$

Hvor

$\Delta p$  er tryktabet [Pa]

Zeta er en gnidningsmodstand [\*]

$\rho$  er densiteten af fjernvarmevandet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

V er vandets hastighed [m/s]

## Ventiler

For ventiler gælder blændeformlen

$$Q = Cd * A * \sqrt{\frac{2}{\rho} * \Delta p}$$

Hvor

Cd er dysekonstanten [\*]

A er arealet i ventilen [m<sup>2</sup>]

ρ er densiteten af vandet [kg/m<sup>3</sup>]

Δp er tryktabet [Pa]

Tab for motor og for frekvensomformer er på hver 5 %

## Trykstød

I det følgende forklares ganske kort, baseret på (Larsen, 2007), hvordan der teoretisk kan regnes på de trykstød, der i arbejdes på at undgå.

Ifølge artiklen, Trykstød i pumpeledninger (Larsen, 2007), opstår trykstød, når pumper startes eller stoppes. Artiklen tager udgangspunkt i tilfældet hvor pumper stoppes, fordi den case, der anvendes viser de største trykstød, når pumpen stoppes. Der vil kunne observeres tilsvarende ved åbning og lukning af ventiler. Disse trykstød kan forårsage såvel over- som undertryk. Det vurderes i artiklen, at overtryk er den kraftigste belastning af røret og at det samtidig er den hyppigste årsag til brud i rør. Mens undertryk vil kunne forårsage at røret klapper sammen eller suger luft eller forurennet vand ind i systemet.

I samme artikel henvises til den russiske ingeniør N. Joukowskys formel for beregning af den trykændring der opstår som følge af en hastighedsændring. Formlen ser således ud:

$$\Delta h = \pm \frac{c}{g} * \Delta v$$

Hvor

$\Delta h$  er ændringen i trykniveau [mVs]

C er trykbølgens forplantningshastighed [m/s]

G er tyngdeaccelerationen [ $m/s^2$ ]

$\Delta v$  er hastighedsændringen [m/s]

Fortegnet + gælder på opstrøms side af ventil eller pumpe, mens minus – gælder på den anden side af ventil eller pumpe.

Denne formel angiver også, at trykændring vil forårsage en hastighedsændring.



## Problemformulering

For at undgå det føromtalt overshoot på trykket i fjernvarmenettet, vil det være interessant at udarbejde en reguleringsstrategi, der kan sikre en optimal opstart af pumperne. Derfor lyder problemformuleringen således:

Hvorledes kan en regulatorstrategi udarbejdes og hvorledes kan den se ud, når dens formål er at eliminere lydgener hos fjernvarmekunderne som følge af trykbølger i rørene som følge af opstart af pumperne?

Det ønskes, at risetime bliver 135 s +/- 5s. Dette er valgt, da ventilen er sat til at åbne henholdsvis lukke på 135s.

Overshoot ønskes under 5 %.

## Beskrivelse af projektet

Projektet bliver en fortsættelse af praktikrapporten, som er skrevet hos og i samarbejde med Aalborg Forsyning, Varme. Der er i praktikrapporten beskrevet to forsøg på en udvalgt del af fjernvarmenetværket i Aalborg. I dette projekt arbejdes der videre med disse forsøgsdata og der foretages nye forsøg for at udvikle modeller til at simulere systemet eller til at analysere dynamikken under opstart af pumper.

Det forventes, at følgende forsøg udføres:

1. Opstart af pumper helt uden regulering
2. Genskab problemstillingen ved øget fiktivt forbrug

Der udføres forsøg sammen med Aalborg Forsyning, Varme til test af regulatorerne.

Projektrapport og indhold er opbygget som følger:

- De reguleringstekniske aspekter omhandlende fjernvarme beskrives.
- Den konkrete problemstilling analyseres og forsøgsdata præsenteres.
- Modeller opstilles på baggrund af forsøgsdata og sammenlignes med målinger og det evalueres i hvilket omfang målte data passer med simuleringer.
- Forskellige reguleringsstrategier opstilles (både Open Loop og Closed Loop) og afprøves i model
- Resultater diskuteres og en konklusion opstilles

## Problemafgrænsning

I modelleringen af systemet ses der bort fra forsinkelsen. Der er for nuværende indlagt en forsinkelse i opstarten af pumperne. Grunden til dette er, at pumperne ikke må starte for tidligt eller for hurtigt, da det giver trykstød i fjernvarmevandet. Forsinkelsen undlades i modellen, da det formodes, at der kan udarbejdes en reguleringsstrategi, der opstarter pumpen tilpas langsomt til at undgå disse trykstød.

Der er usikkerheder forbundet med de foretagne målinger. Dels er der en tidsmæssig forsinkelse på målingerne. Dels er selve målingerne upræcise, da måleudstyret ikke kunne opsættes præcist.

Der vil endvidere være usikkerheder i forbindelse med forbrug og forbrugsmønster.

Der vil også opstå usikkerheder ved ikke planlagte udetider på diverse produktionsenheder. Det gør sig også gældende ved eventuel opstart eller nedlukning af produktionsenheder.

Derudover er der noget dynamik i systemet, som det ikke har været muligt at beregne eller forudse af tidsmæssige årsager. De tidligere omtalte store udsving i energibehov, flow, tryk og temperaturer gør beregningerne komplekse.

Det er fravalgt at gå ind i beskrivelse og udregninger af trykstød i fjernvarmevandet af tidsmæssige årsager.

Der er som tidligere beskrevet udsving i temperatur, tryk og flow. Disse udsving ses der bort fra i modellen og også i reguleringen, om end der simuleres en ændring i disse faktorer for at analysere, hvor følsom regulatoren er for disse.

Det var intentionen, at regulatorer skulle afprøves og testes direkte på Vangen Pumpestation hos Aalborg Forsyning, Varme, men dette er ikke blevet realiseret. Det er fravalgt af tidsmæssige årsager.

Da det lykkes at lave et forsøg med opstartning af pumper uden de nuværende regulatorer, er det fravalgt at arbejde videre med data fra tidligere. Det skyldes, at hensigten er at regulere direkte på opstarten af pumper uden den nuværende regulering. Den nuværende regulering indeholder blandt andet en forsinkelse for at undgå en for hurtig opstart af pumperne.

## Problemløsning

I søgningen af løsninger til problemstillingen med trykstød i fjernvarmerørene, som giver støjgener hos forbrugerne er der udarbejdet et forsøg. Der er taget udgangspunkt i Vangen Pumpestation, fordi der ikke er forbrugere koblet direkte på ledningerne fra denne. Det er lykkedes at lave et forsøg, hvor pumperne startes op helt uden den nuværende regulering.

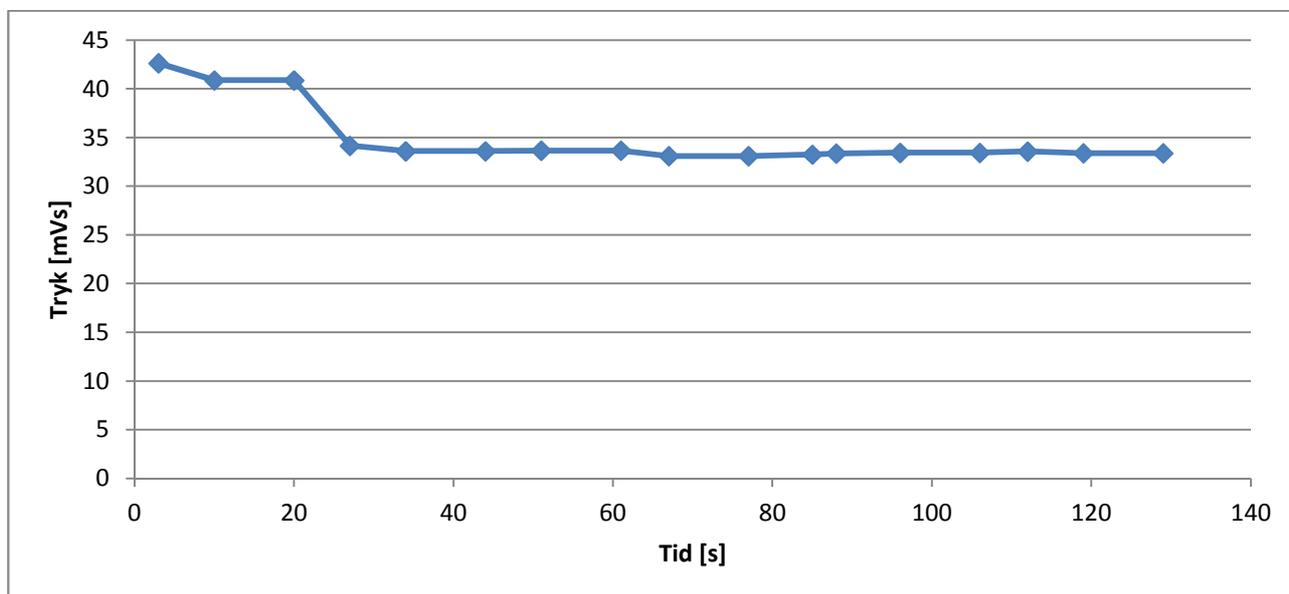
Ud fra målingen af trykket under dette forsøg er der fittet en model i Simulink. Med udgangspunkt i denne model er der beregnet en regulator, som desværre ikke virker, men der er taget udgangspunkt i denne beregning, da regulatoren blev fittet i Simulink.

Der er også udarbejdet forslag til open-loop-regulering af pumperne.

Men først, som skrevet ,laves der en model.

## Model

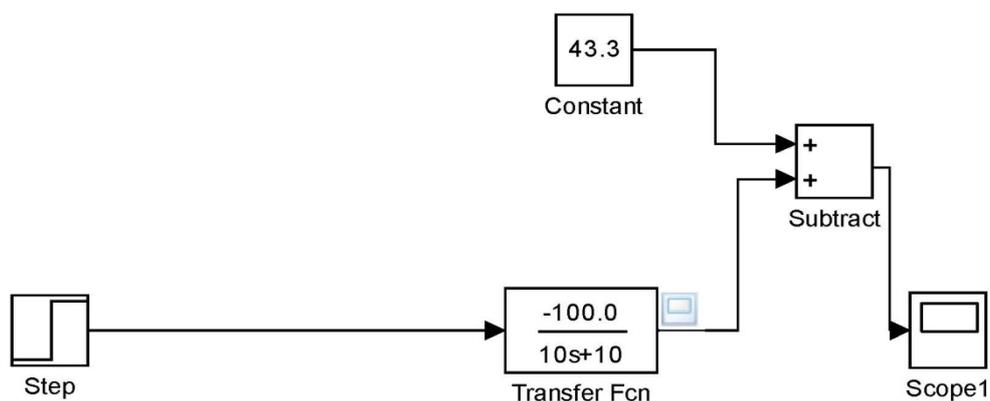
På Figur 17 ses et udtryk for returtrykket på Vangen Pumpestation, når pumperne opstartes helt uden regulering:



Figur 17 viser returtrykket på Vangen Pumpestation under opstart af pumper

Da det antages, at de første 20 sekunders stilstand i trykket skyldes forsinkelser i målingerne, ses der bort fra disse.

Model er fittet i Simulink. Den ses på Figur 18 således ud:



Figur 18 viser opstillingen i Simulink til fitting af model

Inputtet er et step-input. Dette skal ses som en on-off-funktion. Denne skal altså tænde for pumperne. Transfer FCn eller overføringsfunktionen er fittet således, at visningen i scopet tilnærmelsesvis ligner målingen udført på Vangen Pumpestation. Der er derudover tilføjet en konstant på 43,3. Dette skyldes, at der var et tryk i systemet på 43,3 mVs, da forsøget påbegyndtes.

Den fittede model i s-domænet hedder:

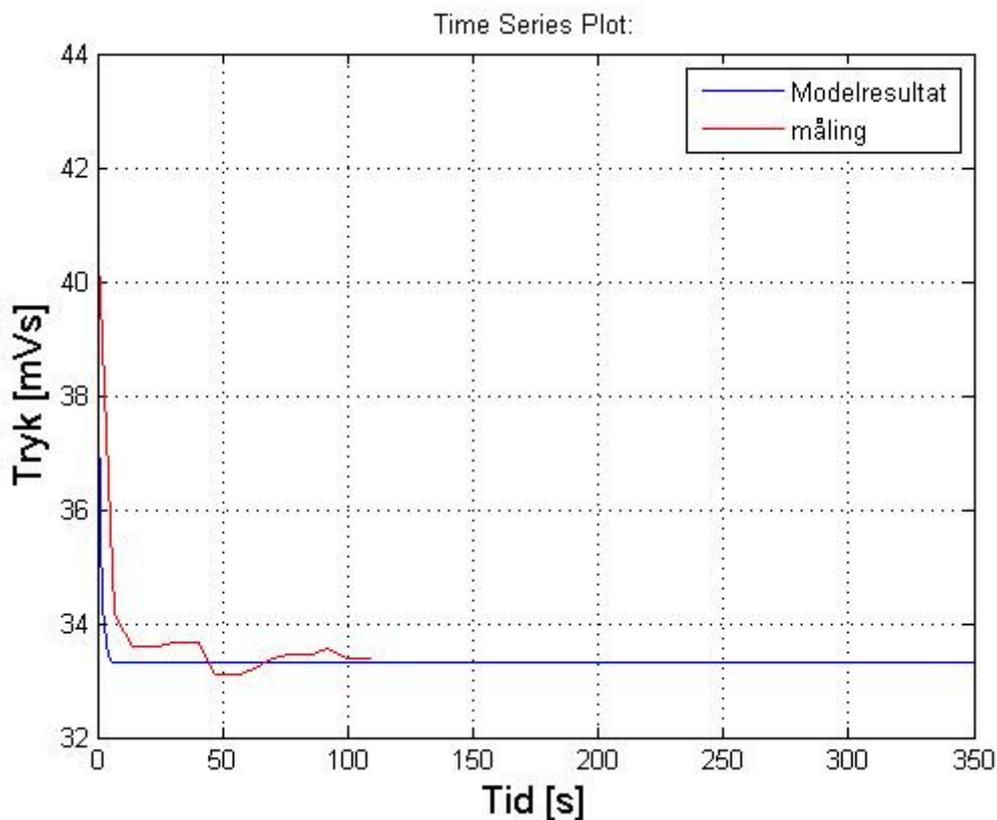
$$E(s) = \frac{-100}{10 * s + 10}$$

For at omregne dette til tids-domænet regnes den inverse Laplacetransformation. Dette giver:

$$e(t) = -10 * e^{-t}$$

Dette er modellen.

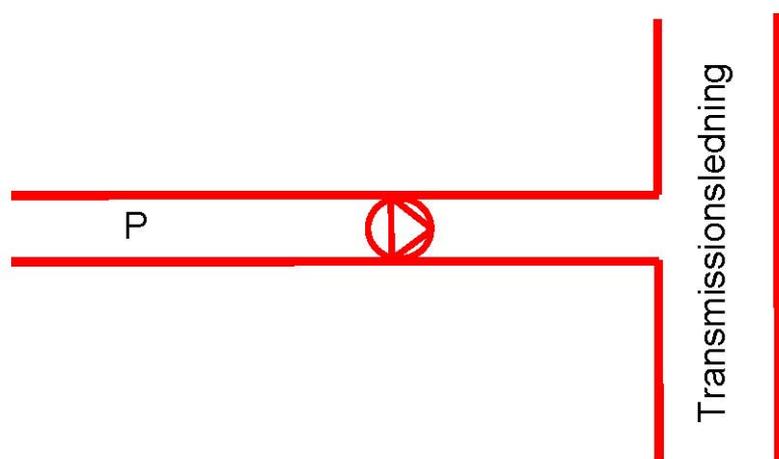
Visningen i scopet sammenholdt med målingen ved opstart af pumper uden regulering se på Figur 19.



Figur 19 viser en sammenligning af måling og resultat af model

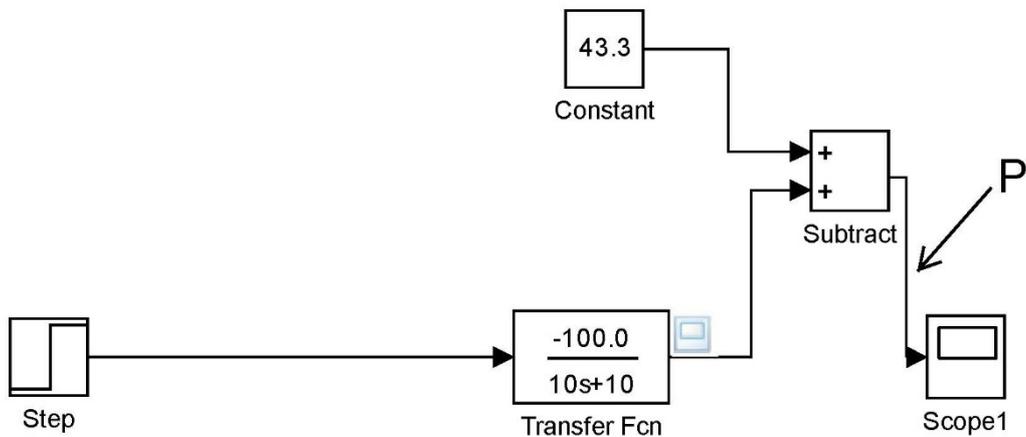
Den røde linje indikerer målingen foretaget under forsøg, mens den blå linje er visningen på scopet. Målingen og resultatet af modellen er ikke fuldstændig sammenfaldende, men det antages, at de usikkerheder, der tidligere er nævnt, er så store, at det er uden betydning, om måling og resultat fra model er fuldstændig sammenfaldende.

Det er derimod påfaldende, at pumperne forårsager, at trykket falder. Det er forventeligt, at pumperne leverer et løft i trykket. I denne situation er årsagen til at trykket falder at finde i placeringen af såvel pumpe som målingen. Trykket måles, når vandet kommer ind på pumpestationen, og det måles igen, inden det forlader pumpestationen. Denne sidste måling ændrer sig ikke, når pumperne startes op. Dette skyldes, at rørene er direkte forbundet med den store transmissionsledning, så pumperne kan ikke øge trykket på denne side. I stedet sker der et fald i trykket på sugesiden af pumpen. (Se Figur 20.) På denne måde leverer pumpen et løft i trykket. P indikerer, hvor der måles tryk.



Figur 20 viser en simplificeret principskitse af opsætning af pumper i forhold til transmissionsledning

Tilsvarende kan ses på Simulink-modellen på Figur 21. Her er indikeret med et P, hvor trykket er simuleret.

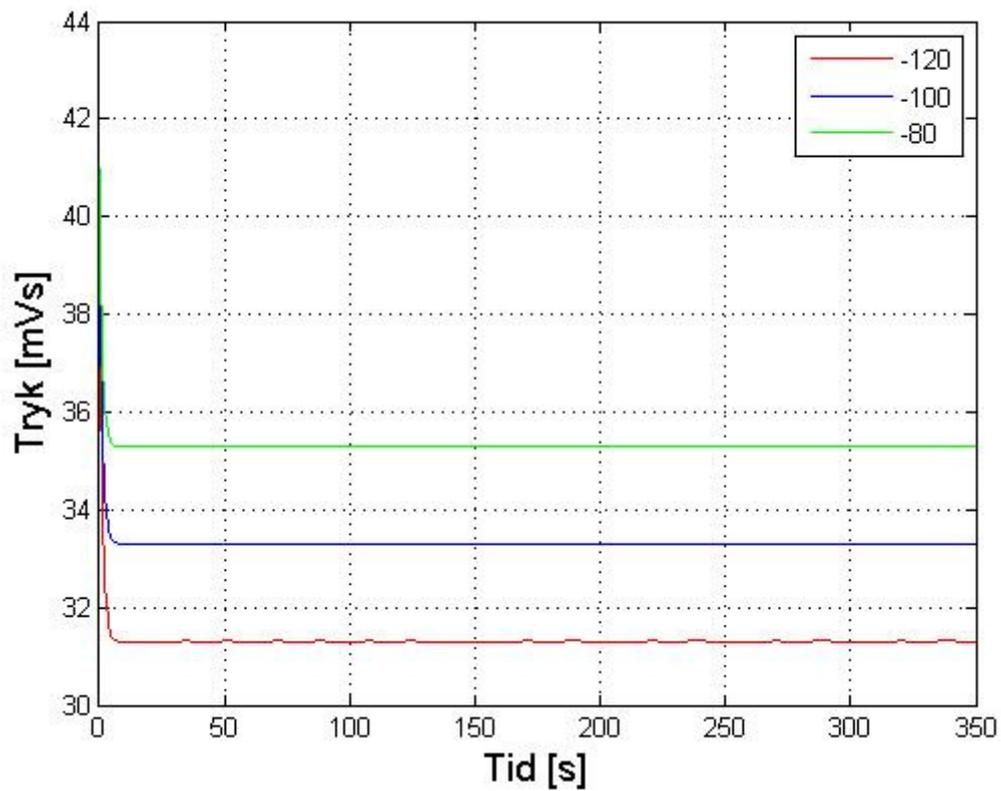


Figur 21 viser Simulink-modellen, hvor P angiver, hvor trykket fra før genfindes

Sensibilitetsanalyse:

For at vise, hvor sensibel modellen er for ændringer, er der udarbejdet en sensitivitetsanalyse. Der er som tidligere nævnt udsving i såvel forbrug, flow, tryk og temperatur. Derfor er det interessant at undersøge, i hvor høj grad modellen er sensibel overfor sådanne ændringer. Modellen gælder kun i denne ene situation, som var udgangspunktet under forsøgene, hvor flowet i gennemsnit ligger på ca.  $185 \text{ M}^3/\text{h}$ . Temperaturen på returløbet har ligget på ca.  $39,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , og temperaturen på fremløbet har ligget på ca.  $75,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

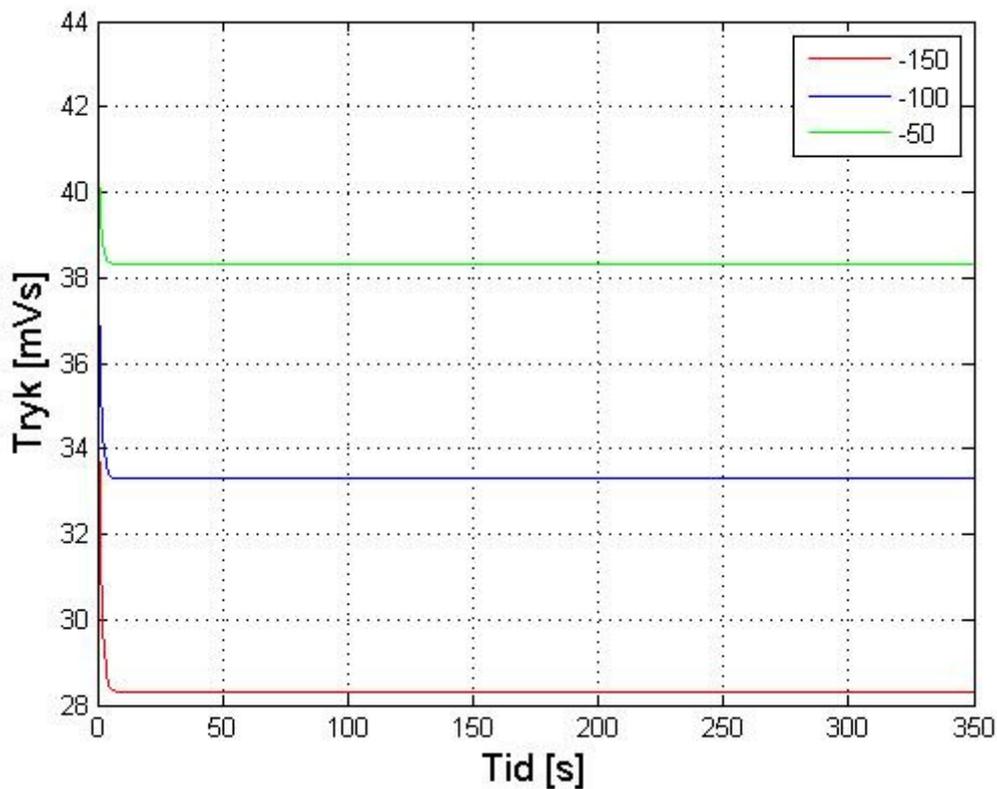
På Figur 22 ses, hvorledes trykket ændres, hvis gainet ændres +/- 20 %:



Figur 22 viser hvorledes trykket ændres, når gainet ændres +/- 20 %

På Figur 22 ses, at hvis gainet ændres +/- 20 %, så vil trykket ændres +/- 1 mVs. Det svarer til en ændring på ca. 3 %.

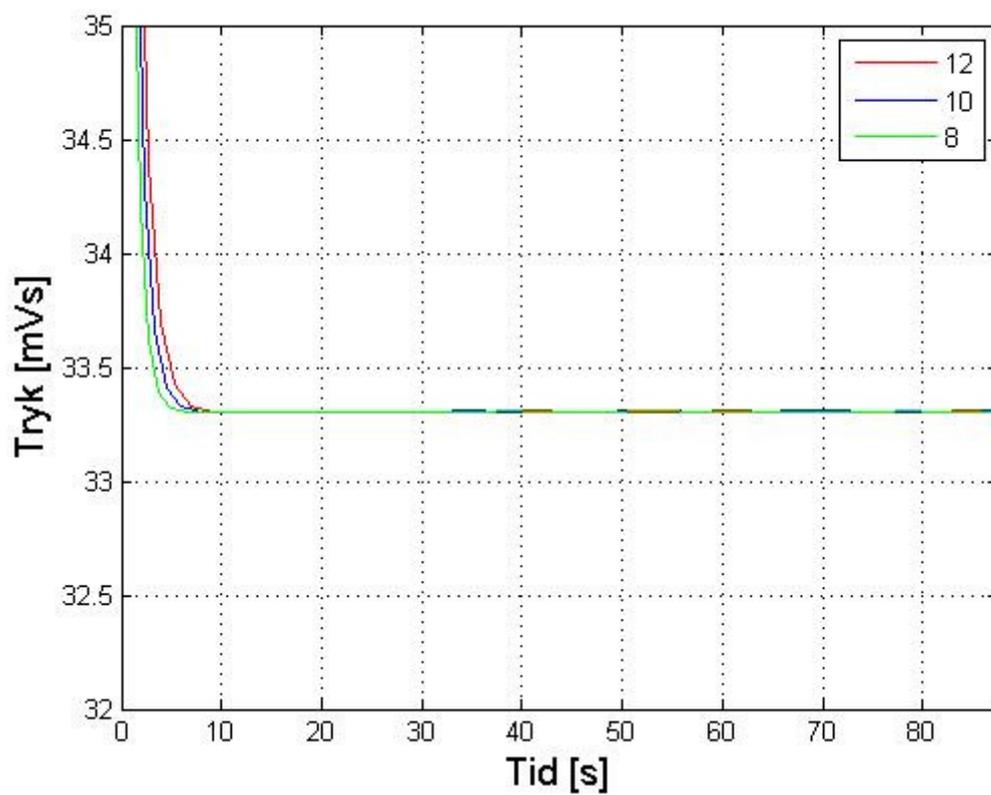
Hvis gainet derimode ændres +/- 50 %, ændres trykket, som det fremgår af Figur 23, til:



Figur 23 viser hvorledes trykket ændres, når gainet ændres +/- 50 %

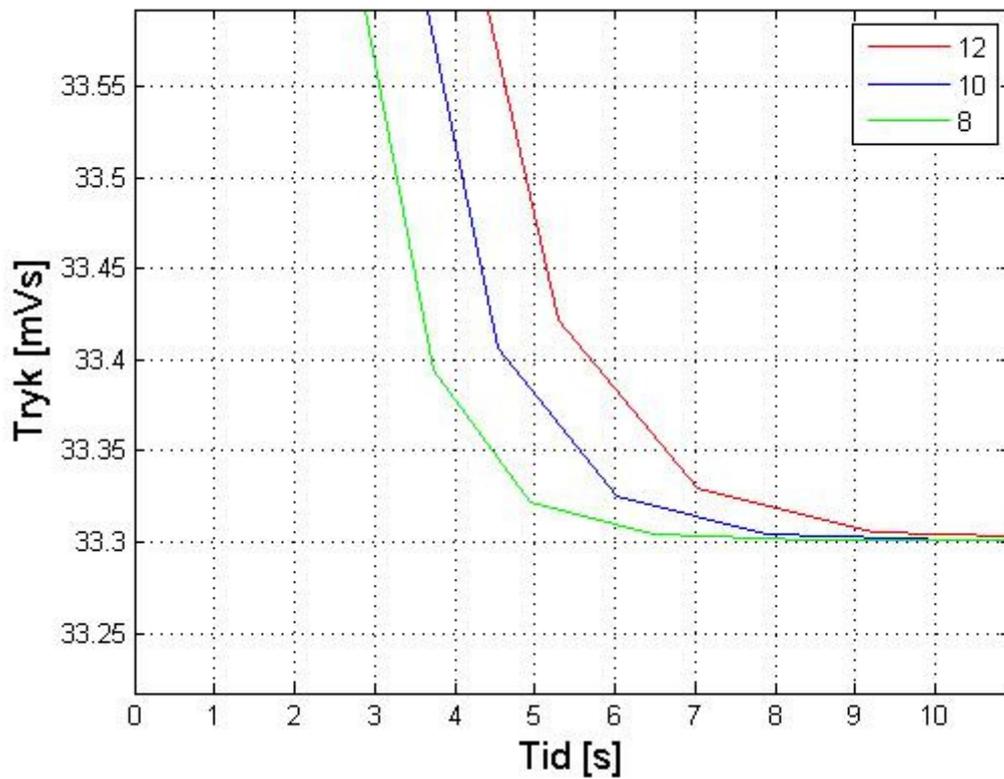
På Figur 23 ses, at når gainet ændres +/- 50 %, så ændres trykket +/- 5 mVs, hvilket svarer til næsten 15 %. Det er imidlertid ikke sandsynligt, at forbrug, flow, tryk eller temperatur pludseligt ændres med 50 %. Vangen Pumpestation er en del af et stort og kompliceret system, der bevirker, at sådanne ændringer ikke altid har den forventede virkning. Derfor ville det være interessant at lave et nyt forsøg, når samtlige parametre er så høje som muligt, og lave en sammenligning med modellen. Dette har af tidsmæssige årsager ikke været muligt. Målingen er foretaget i august, hvor forbruget er lavt, men dog i morgentimerne.

Hvis tidskonstanten ændres med +/- 20 % ser det ud som på Figur 24:



Figur 24 viser hvorledes tiden for indsvingning ændres, når tidskonstanten ændres +/- 20%

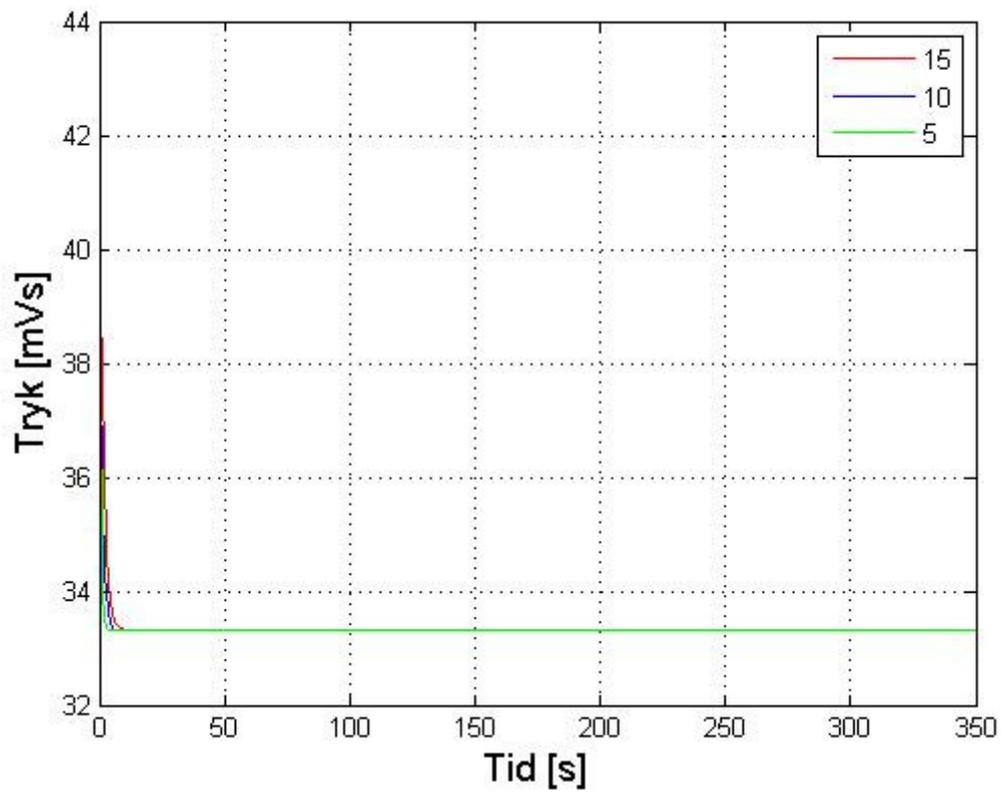
Her er visningerne umiddelbart så tætte, at det tydeliggøres betydeligt ved at zoome ind, som det ses på Figur 25:



Figur 25 viser hvorledes tiden for indsvingning ændres, når tidskonstanten ændres +/- 20%, når der zoomes ind

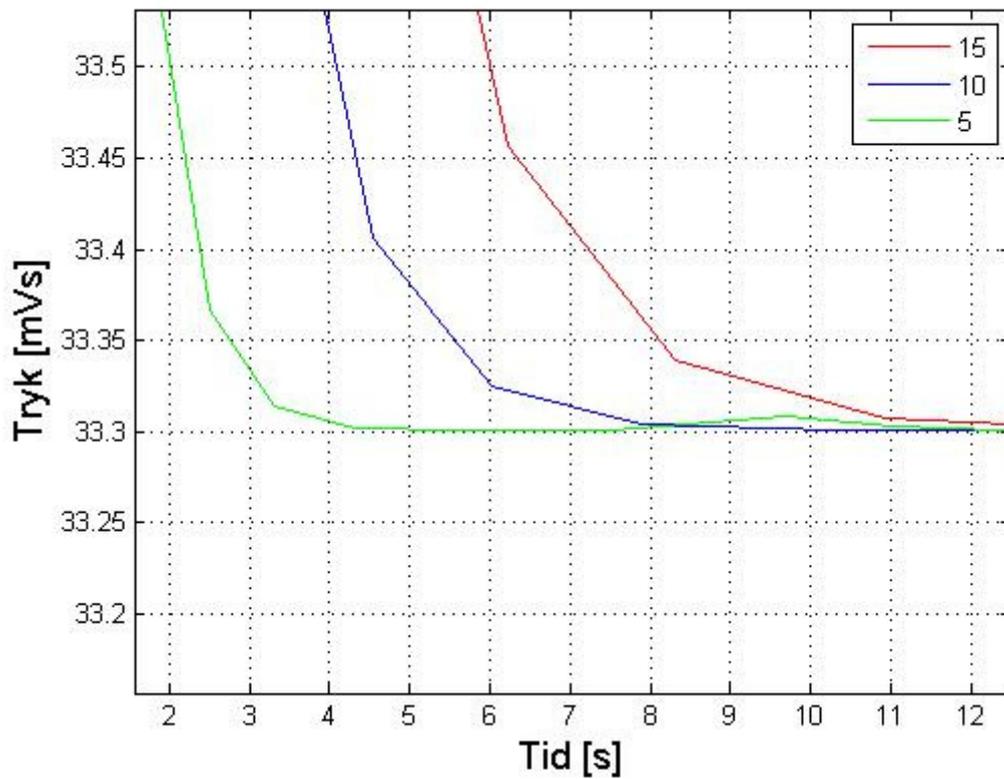
På Figur 25 er det tydeligt, at der sker en tidforskydning. Når tidskonstanten ændres +/- 20%, ændres tiden, inden trykket finder ind på det ønskede niveau fra ca. 7,5 s til 10,5 s. Det er en afvigelse på +/- 1,5 s. Dette svarer til ca. 17 %.

Hvis tidskonstanten derimode ændres +/- 50 %, ser det ud som på Figur 26:



Figur 26 viser hvorledes tiden for indsvingning ændres, når tidskonstanten ændres +/- 50%

Ligesom ved ændringer på 20 % er det nødvendigt at zoomme ind for at se forskellen, som det se på Figur 27:



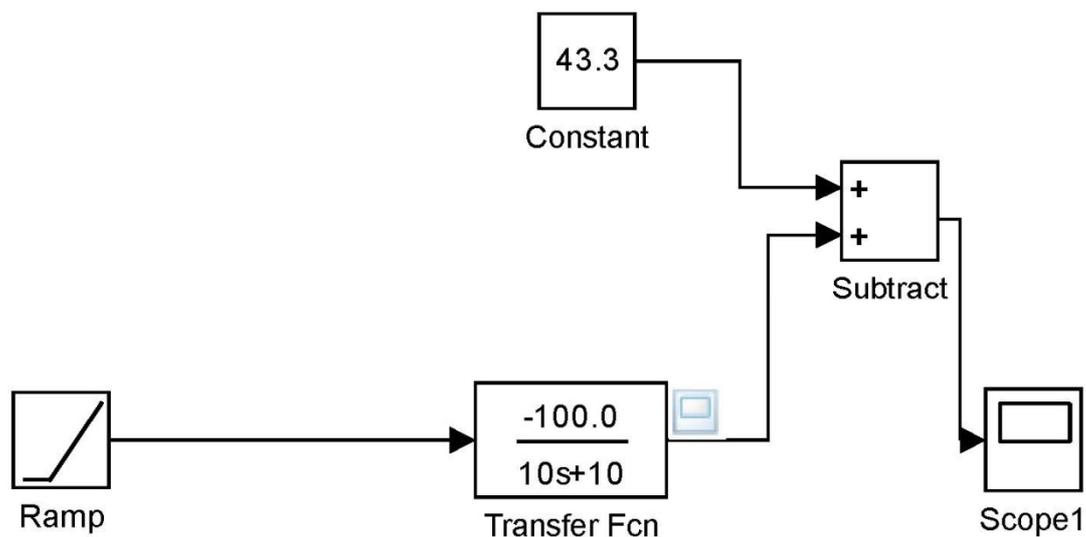
Figur 27 viser hvorledes tiden for indsvingning ændres, når tidskonstanten ændres +/- 50%, når der er zoomet ind

På Figur 27 bliver det tydeligt, at når tidskonstanten ændres med +/- 50 %, så ændres tiden, inden trykket finder det rette niveau +/- 4 s. Dette er en ret stor afvigelse på +/- 44 %. Dette er en vigtig oplysning. Det er et langsomt system, og det tager ikke vel imod hurtige ændringer. Det er sandsynligt, at selve pumpen reagerer tilsvarende modellen. Pumpen er hurtig til at reagere, derfor opsættes der reguleringer, der får pumpen til at reagere langsommere.

## Reguleringsstrategi

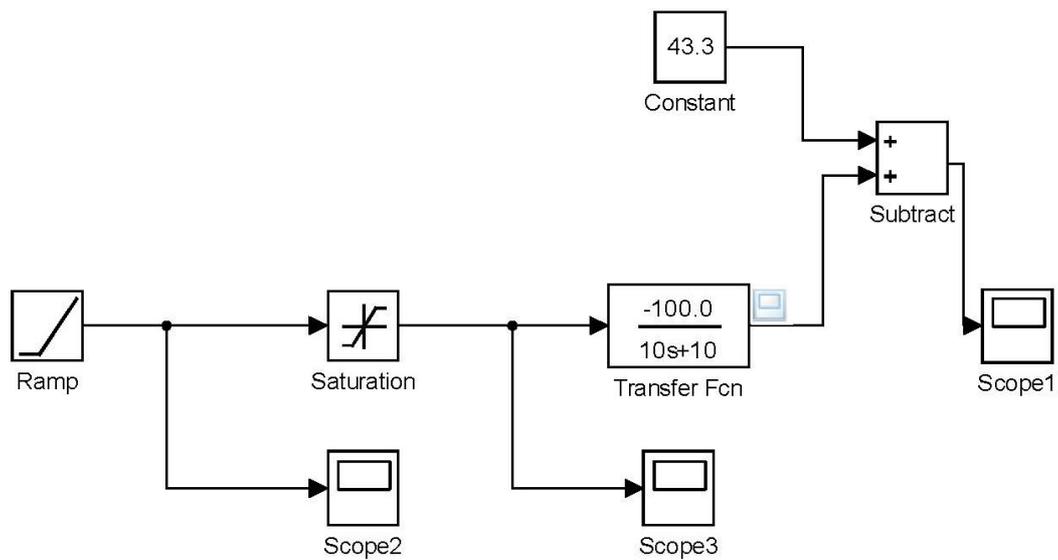
Der kan udarbejdes reguleringsstrategier direkte på dette system. Dette kan kaldes open-loop-regulering.

Til denne reguleringsstrategi indsættes et rampeinput i stedet for det nuværende step-input. Det vil medføre, at pumperne starter langsommere op. Systemet kommer til at se ud som vist på Figur 28:



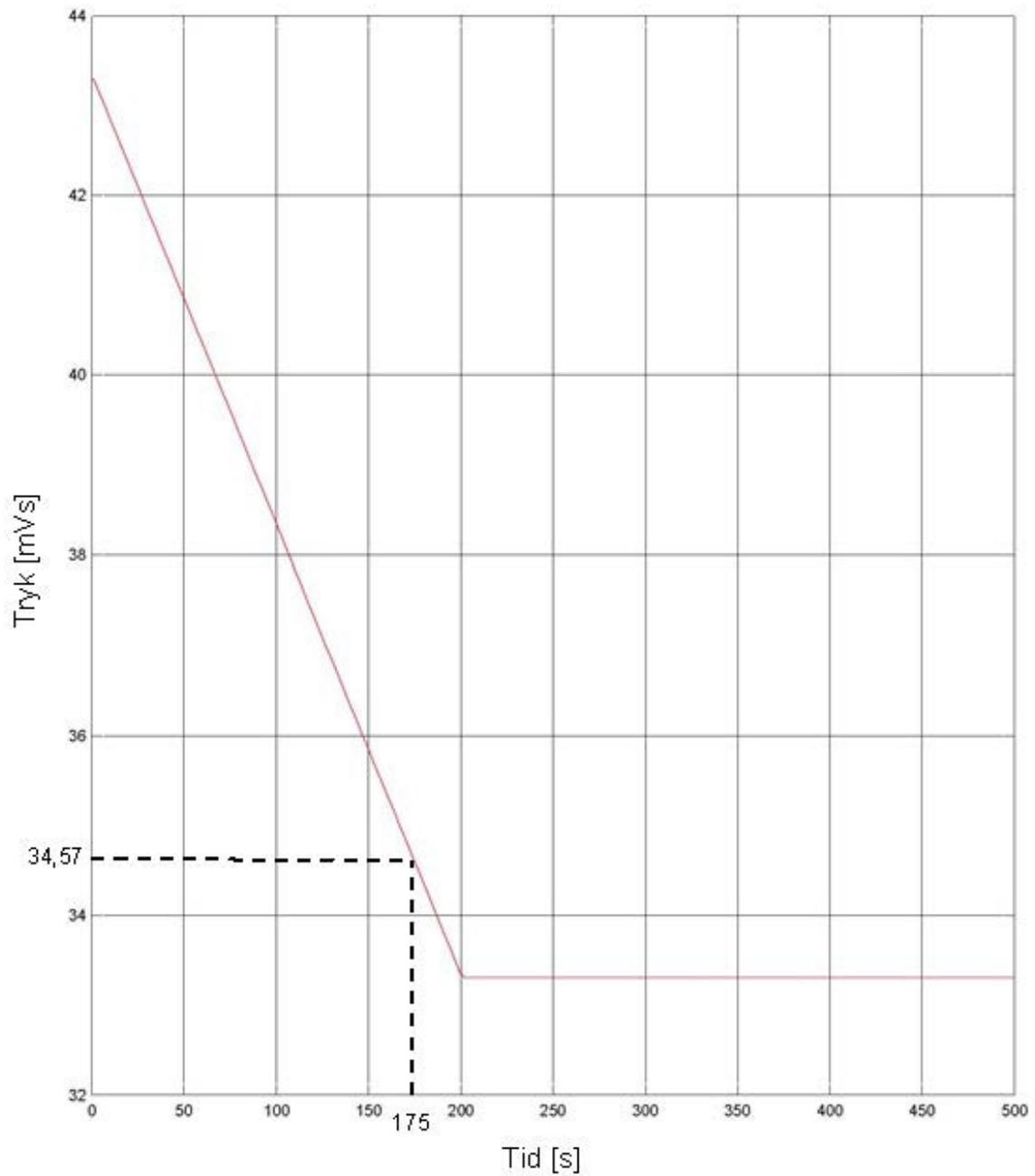
Figur 28 viser simulinkmodellen med et rampeinput som reguleringsstrategi

Da et rampeinput bliver ved med at stige, skal der indsættes en saturation til at begrænse stigningen. Modellen er udarbejdet således, at inputtet til overføringsfunktionen skal være 0-1, derfor fungerer det ikke, hvis rampeinputtet er indført direkte i overføringsfunktionen. Det ses, at der er indsat en saturation på Figur 29:



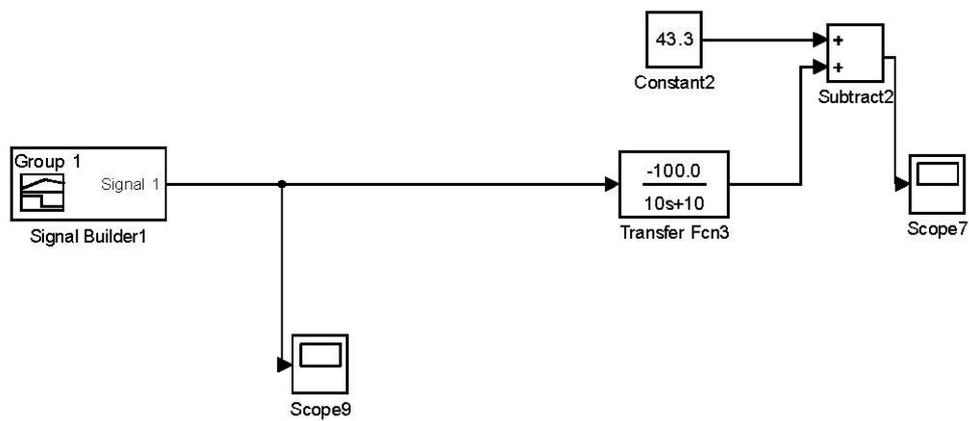
Figur 29 viser simulinkmodellen med et rampeinput og en saturation som reguleringsstrategi

Som det ses på Figur 29 er der yderligere indsat to scoper. Disse er blot indsat for at kunne holde øje med, hvad output fra rampen er, samtidig med inputtet til saturationen. Scope 3 er for kunne observere, at inputtet til overføringsfunktionen ikke overstiger 1. Dette er overholdt, så derfor viser scope 1 en meget fin opstart af pumperne. Den viser, at risetime er ca. 175 s, hvilket er lidt for langsomt i forhold til designkriterierne. Til gengæld er der ingen overshoot. Dette fremgår af Figur 30



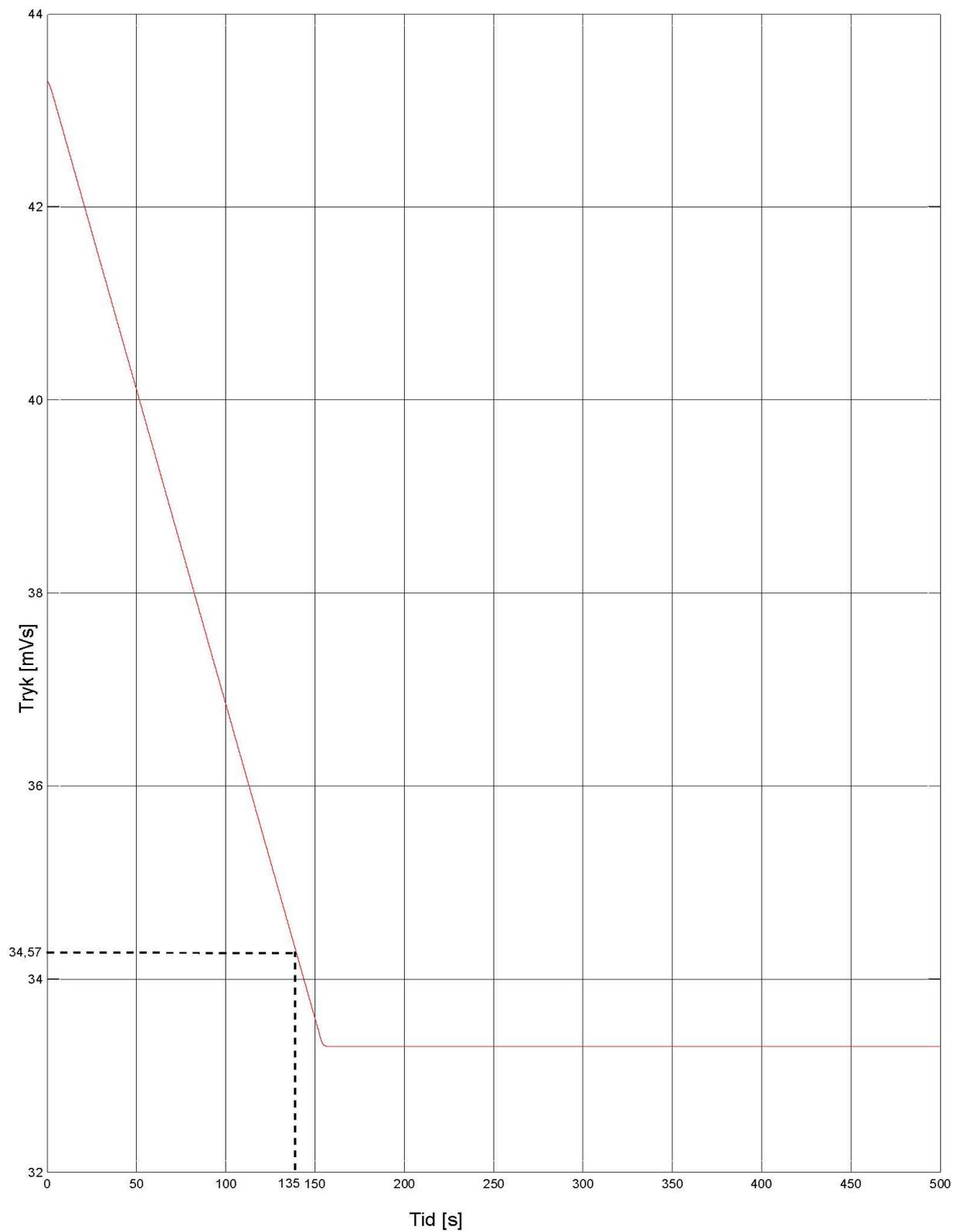
Figur 30 viser trykændringen fra simulinkmodellen med et rampeinput og en saturation som reguleringsstrategi

Det er muligt i Simulink at designe inputtet fuldstændigt i blokken, der hedder Signal Builder. Dette er anvendt i den følgende model, som ses på Figur 31:



Figur 31 viser simulinkmodellen med Signal Builder som reguleringsstrategi

I Signal Builder er inputtet designet til at stige til 1 over 153,5 s. Dette bevirker, at scope 7 viser følgende, se Figur 32:



Figur 32 viser trykændringen fra simulinkmodellen med Signal Builder som reguleringsstrategi

Det fremgår af Figur 32, at risetime er ca. 135 s. Dette er en opfyldelse af designkriteriet. Yderligere ses ingen overshoot. Dermed at kravene imødekommet..

## Regulering

Ved regulering vælges en fasemargin på  $30^\circ$  til  $60^\circ$ . Der vælges derfor en fasemargin på  $45^\circ$ .

På bodeplot er frekvensen aflæst ved en fasemargin på

$$-180^\circ + 45^\circ + 5^\circ = -130^\circ$$

Frekvensen er aflæst til

$$\omega = 1,19 \text{ rad/s}$$

Ud fra denne frekvens er forstærkningen aflæst til

$$G = 16,2 \text{ dB}$$

Denne er omregnet til

$$10^{16,2/20} = 6,4565$$

Dette betyder, at proportionalledet bliver

$$K_p = \frac{1}{6,4565} = 0,15488$$

Frekvensen beregnes til

$$\omega_0 = 0,1 * 1,19 = 0,119$$

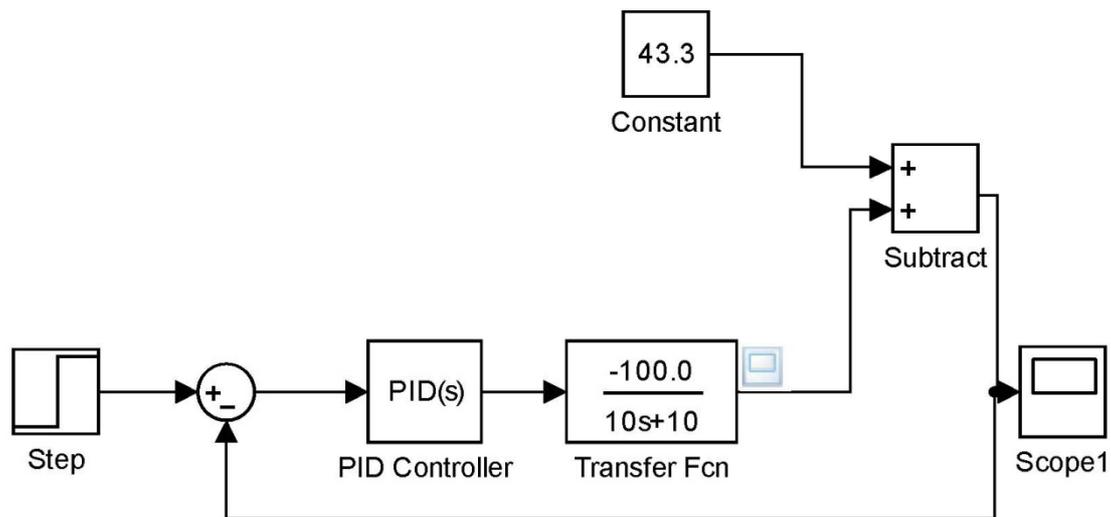
Deraf følger, at integralledet bliver

$$K_I = K_p * \omega_0 = 0,15488 * 0,119 = 0,01843$$

Regulatorens overføringsfunktion bliver da

$$G_c(s) = 0,155 + \frac{0,01843}{s}$$

Dette virker imidlertid ikke efter hensigten. Ligesom selve modellen er fittet i Simulink, så er regulatoren også fittet, men med udgangspunkt i ovenstående beregning. Modellen med regulatoren ses på Figur 33:



Figur 33 viser simulinkmodellen med en PI-regulator som reguleringsstrategi

Proportionalledet er fittet til

$$K_p = -0,0015488$$

Integralledet er fittet til

$$K_I = -0,002843$$

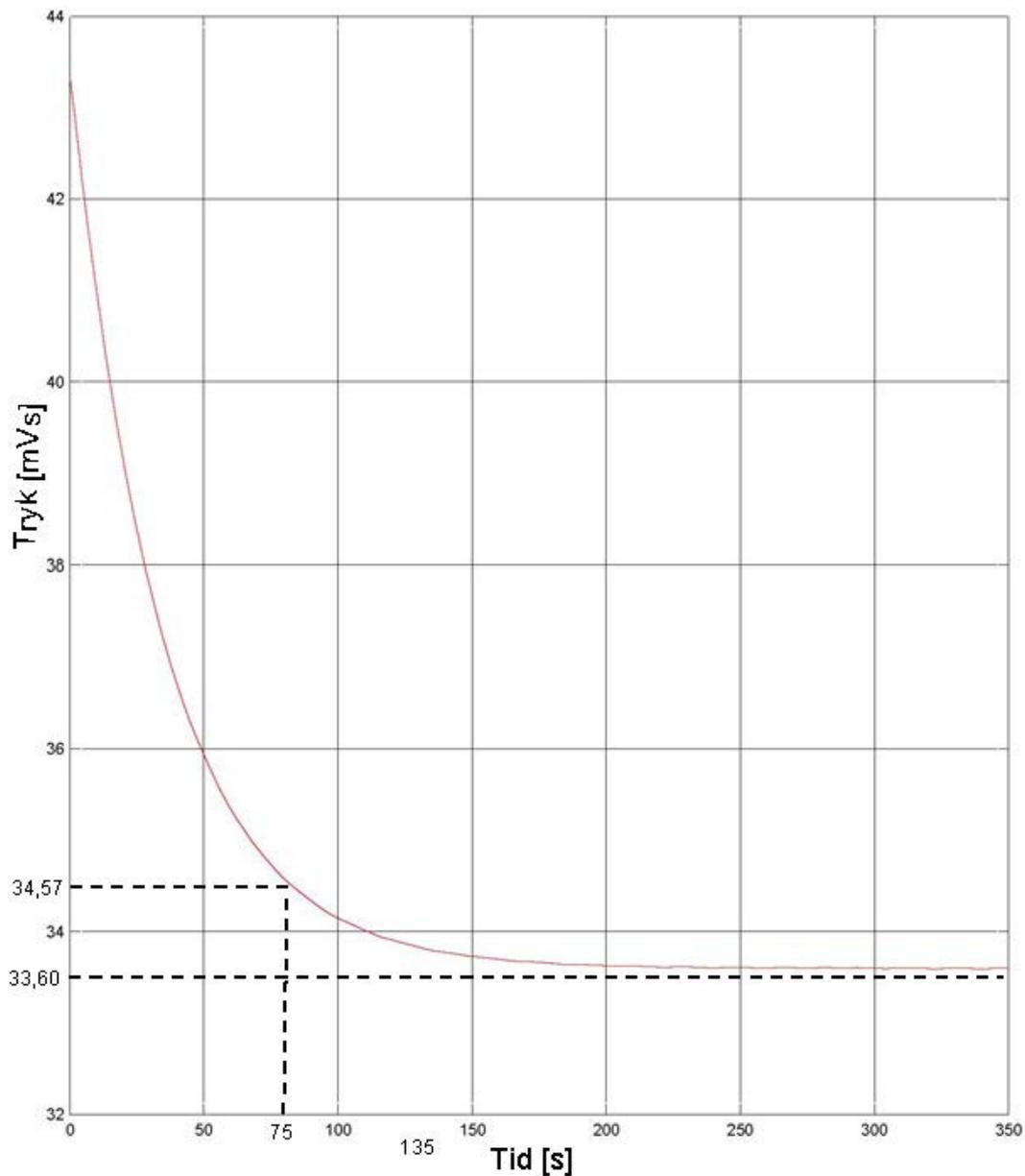
Den fittede regulators overføringsfunktion bliver da:

$$G_c(s) = -0,00155 + \frac{-0,00284}{s}$$

Både proportionalledet og integralledet skal være negative, da trykket falder.

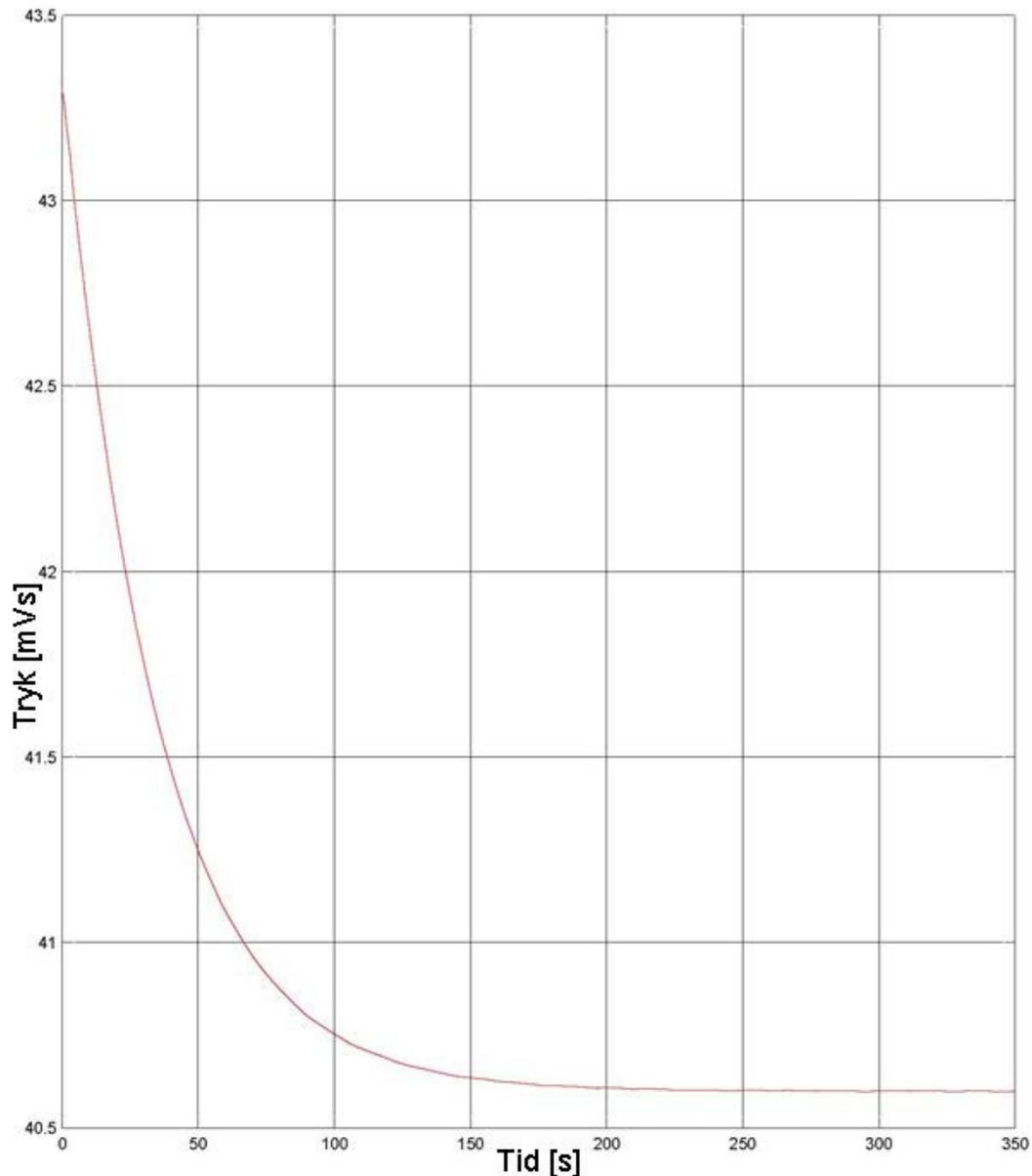
Stepinputtet er nu designet således, at det går fra nul til det ønskede setpunkt.

Når regulatoren er indsat viser scopet følgende, hvis steppet sættes 33,6 mVs, se Figur 34:



Figur 34 viser trykændringen fra simulinkmodellen med en PI-regulator som reguleringsstrategi, når setpunktet er 33,6 mVs

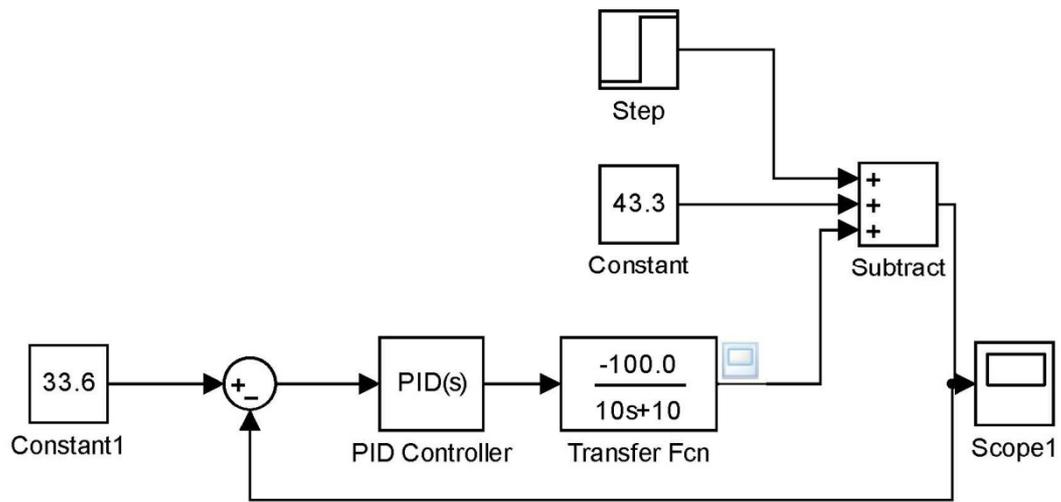
Som det ses på Figur 34 er regulatoren stadig for hurtig. Risetime er her ca. 75 s. mod de ønskede 135 s. Det ville være muligt at gøre den langsommere, men af tidsmæssige årsager har det ikke været muligt at gøre den langsommere indenfor rammerne af denne rapport. Derimod ses det, at den starter pumpen roligt op og ligger sig meget pænt, men lidt over det ønskede setpunkt helt uden overshoot. Hvis setpunktet ændres til 40,6 mVs, viser scopet følgende, som ses på Figur 35:



Figur 35 viser trykændringen fra simulinkmodellen med en PI-regulator som reguleringsstrategi, når setpunktet er 40,6 mVs

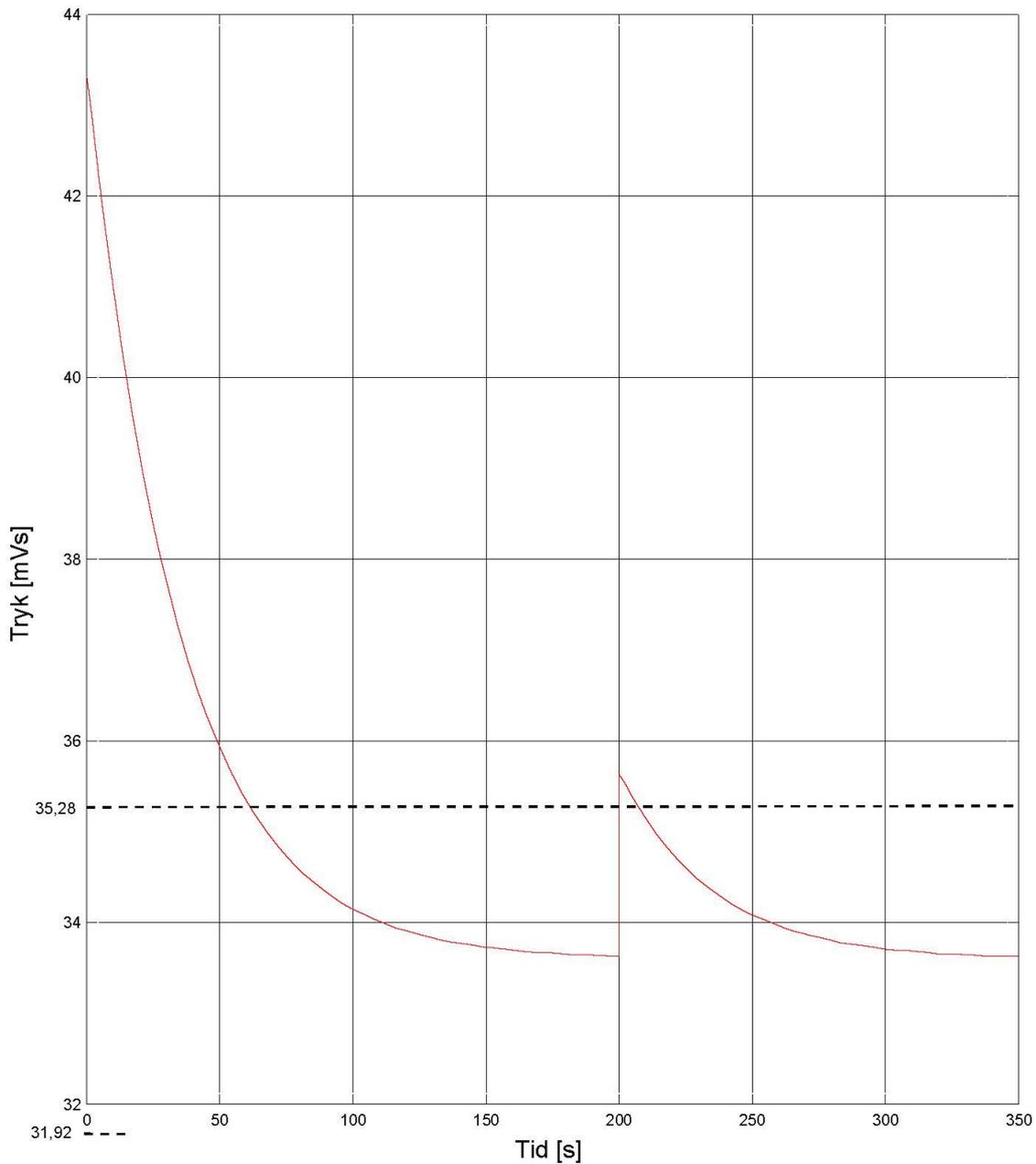
Det ses af Figur 35, at også her er regulatoren for hurtig, men den får trykket til at lægge sig pænt ind – langsommere, end pumpen selv ville gøre, men ikke langsomt nok, da designkriteriet var, at den skulle have en rise-time på 135 s. Men også i denne situation ændres trykket uden overshoot.

Da der forekommer ændringer i forbrug, flow, tryk og temperatur, er det interessant at undersøge, hvorledes regulatoren reagerer på en forstyrrelse. Det kan gøres ved at indsætte et stepinput til subtraktionspunktet, som ses på Figur 36.



Figur 36 viser Simulink modellen med en forstyrrelse påsat i form af et stepinput

Når denne forstyrrelse indvirker på modellen og regulatoren ser scope-visningen ud, som vist på Figur 37:



Figur 37 viser trykændringen fra Simulink modellen med en forstyrrelse påsat i form af et stepinput

En forstyrrelse i form af et stepinput er en ekstrem forstyrrelse. Det ses på Figur 37, at regulatoren ikke håndterer denne særlig godt, idet der kommer et overshoot på ca. 2 mVs, hvilket svarer til 5,9 %. Dette overstiger de acceptable 5 %, som designkriterierne foreskriver. Den stiplede linje angiver et overshoot på 5 %, hvilket svarer til 35,28 mVs.

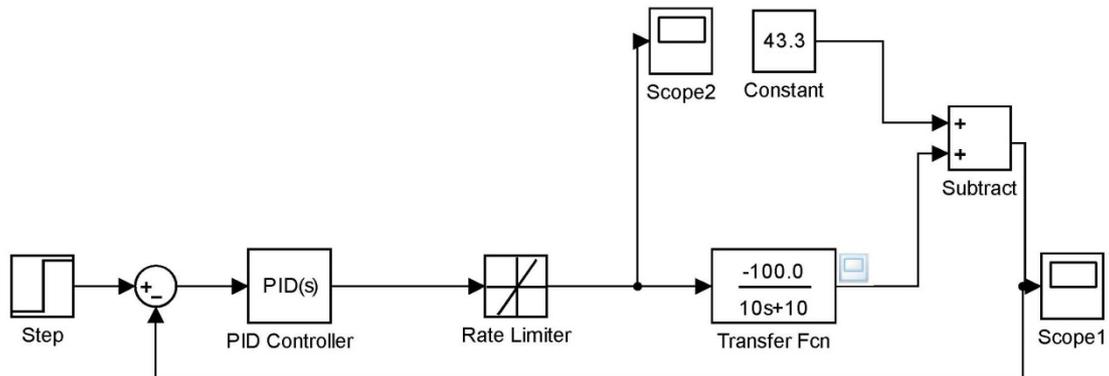


## Diskussion af Resultater

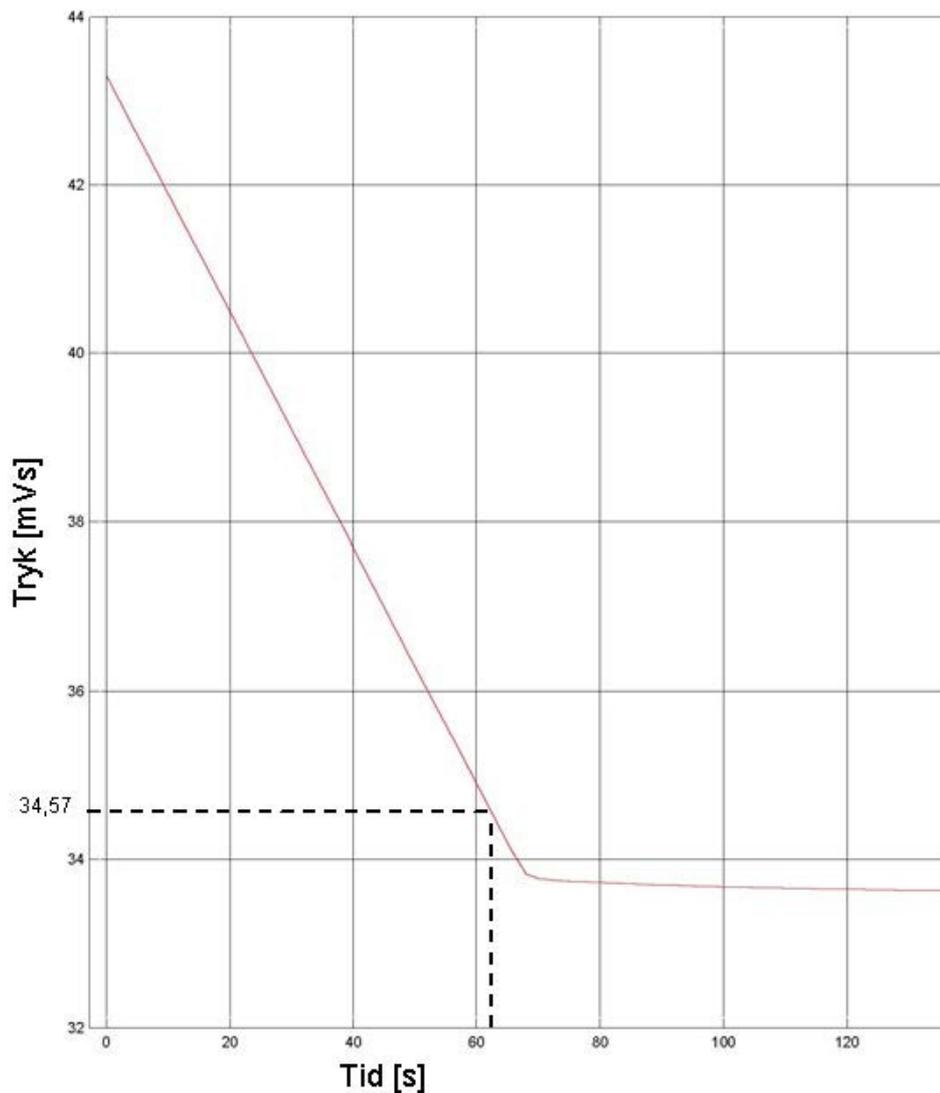
Det fremgår tydeligt af Figur 37, at regulatoren er for hurtig.

Dette kan muligvis afhjælpes ved at indsætte en rampebegrænsning.

Løsningsmodel nr. 1. Her indsættes en rampebegrænsning imellem regulatoren og overføringsfunktionen. Se Figur 38:



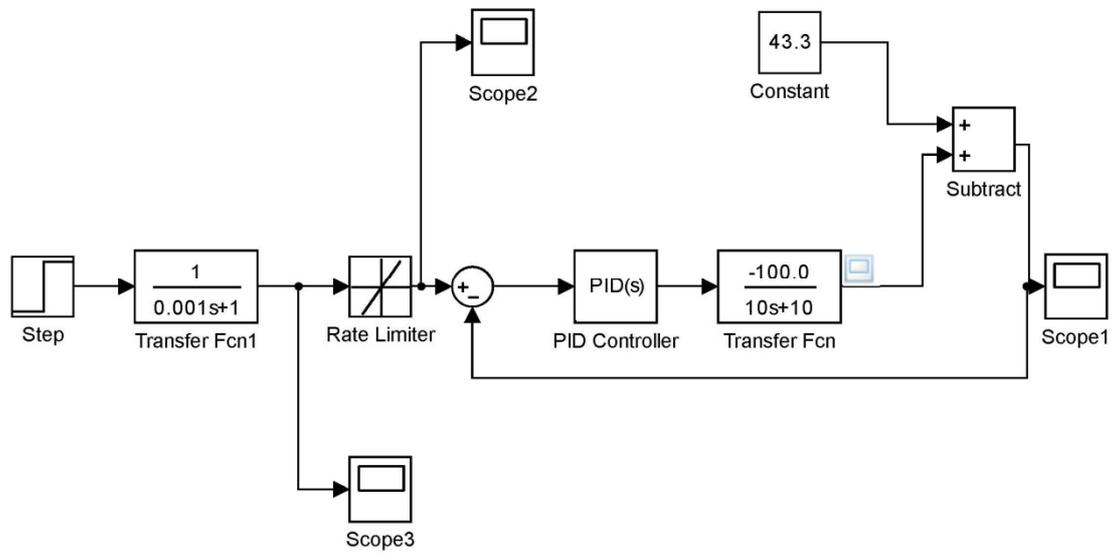
Figur 38 viser Simulinkmodellen med Pi-regulator og rampebegrænsning efter regulatoren



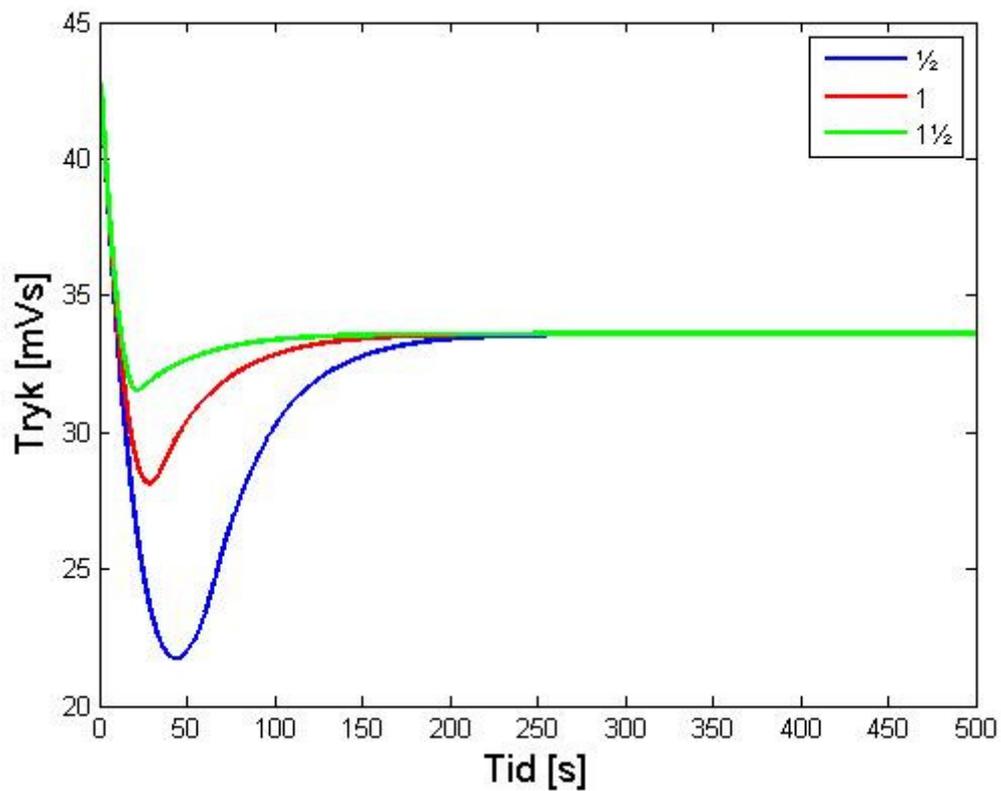
Figur 39 viser trykændringen fra Simulinkmodellen med Pi-regulator og rampebegrænsning efter regulatoren

Som det fremgår af Figur 39, virker denne begrænsning modsat, idet systemet er blevet hurtigere. Risetime er nu lidt over 60 s. Denne fremgangsmåde virker altså ikke i dette tilfælde.

I stedet forsøges der med at indsætter rampebegrænsningen inden regulatoren. Da inputtet til rampebegrænsningen ikke kan være et stepinput, indsættes en lille, hurtigt overføringsfunktion. Denne overføringsfunktion ændrer ikke på det samlede system, men får Simulink til at acceptere, at rampebegrænsningen indsættes før regulatoren. Dette ses på Figur 40.



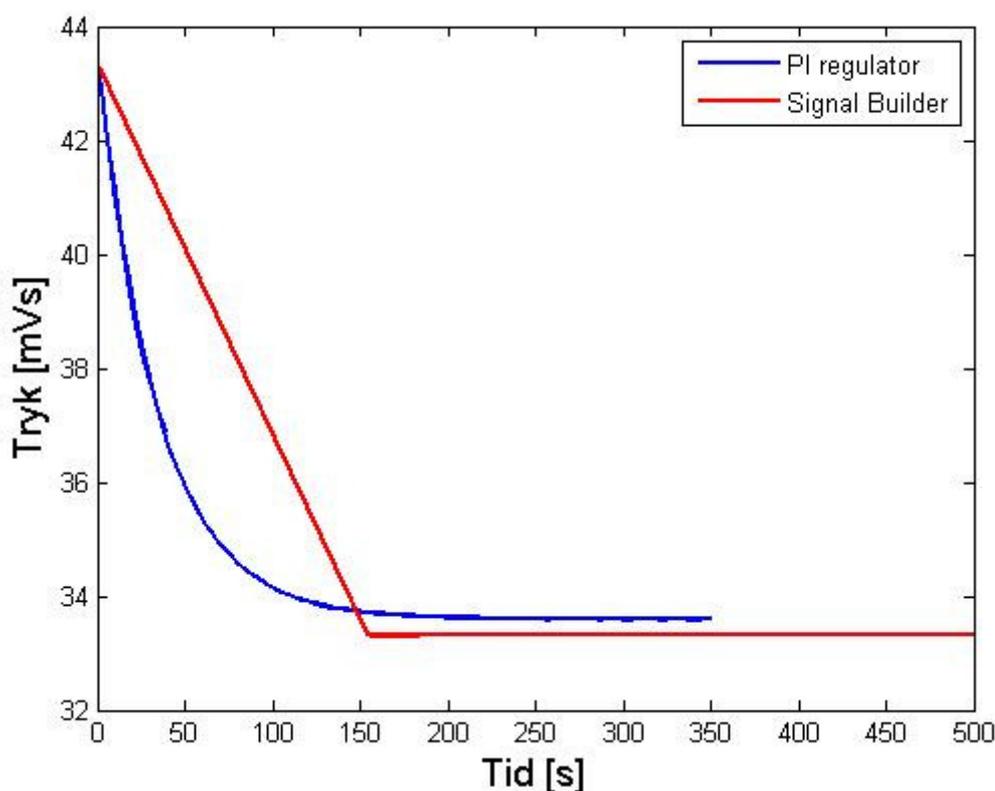
Figur 40 viser Simulinkmodellen med Pi-regulator og rampebegrænsning før regulatoren



Figur 41 viser trykændringen fra Simulinkmodellen med Pi-regulator og rampebegrænsning før regulatoren når rising slew rate ændres fra  $\frac{1}{2}$  til  $1\frac{1}{2}$

Som det fremgår af Figur 41 virker denne fremgangsmåde heller ikke. Det er illustreret, at som mindre rising slew rate bliver, jo større overshoot fremkommer der. Dette er ikke ønskeligt.

Tilbage er så valget imellem en PI-regulator, der er for hurtig i forhold til en reguleringsstrategi, der kan opstarte pumperne fuldstændig som ønsket, men som måske ikke er direkte implementerbar for Aalborg Forsyning, varme. Det har ikke været ønsket fra Aalborg Forsyning, Varme at ændre på indstillingerne på frekvensomformerne. Figur 42 viser en sammenligning mellem trykket beskrevet af systemet med PI-regulatoren og systemet, der har Signal Builder som input.



Figur 42 viser sammenligningen mellem systemet med Pi-regulatoren og systemet med Signal Builder som input

Det ville være mest interessant i samarbejde med Aalborg Forsyning, Varme at forsøge at implementere reguleringsstrategien med Signal Builder forudsat, at det ville være i orden at ændre på frekvensomformernes indstillinger. Alternativt skal det undersøges, hvorledes en Signal Builder kan implementeres i deres nuværende system, og hvilken effekt den vil have på det virkelige system.

Fra Aalborg Forsyning, Varme var en PI-regulator efterspurgt, da den er direkte implementerbar og en kendt teknologi, men den her fittede PI-regulator er ikke optimal, idet den er for hurtig, og har en stationær fejl på 0,3 mVs. Hvis denne løsning skal implementeres, skal det først undersøges via en forsøgsrække, hvorledes den vil virke i det virkelige system. Derefter må den tilpasses, således, at den ikke er for hurtig. Det er derimod forventeligt, at den stationære er så lille, at det er uden betydning.

Alternativt kunne selve modellen gøres afhængig af flow og temperatur. På den måde ville den også fungere i andre situationer end den her nævnte.

## Konklusion

Denne rapport er opbygget på følgende måde. Først en indledning, der beskriver fjernvarmes berettigelse i samfundet. Dernæst kommer en problemanalyse med beskrivelse af variationerne i fjernvarmesystemet samt en beskrivelse af de enkelte parametre, afsluttende med en kort beskrivelse af trykstød, der giver støjgener hos forbrugerne.

Dette leder direkte til problemformuleringen: Hvorledes kan en reguleringsstrategi udarbejdes, og hvorledes kan den se ud, når dens formål er at eliminere støjgener hos fjernvarmekunderne som følge af trykbølger i rørene som følge af opstart af pumperne?

I problemløsningen er der udarbejdet en model på baggrund af en forsøgsmåling.

Dette giver:

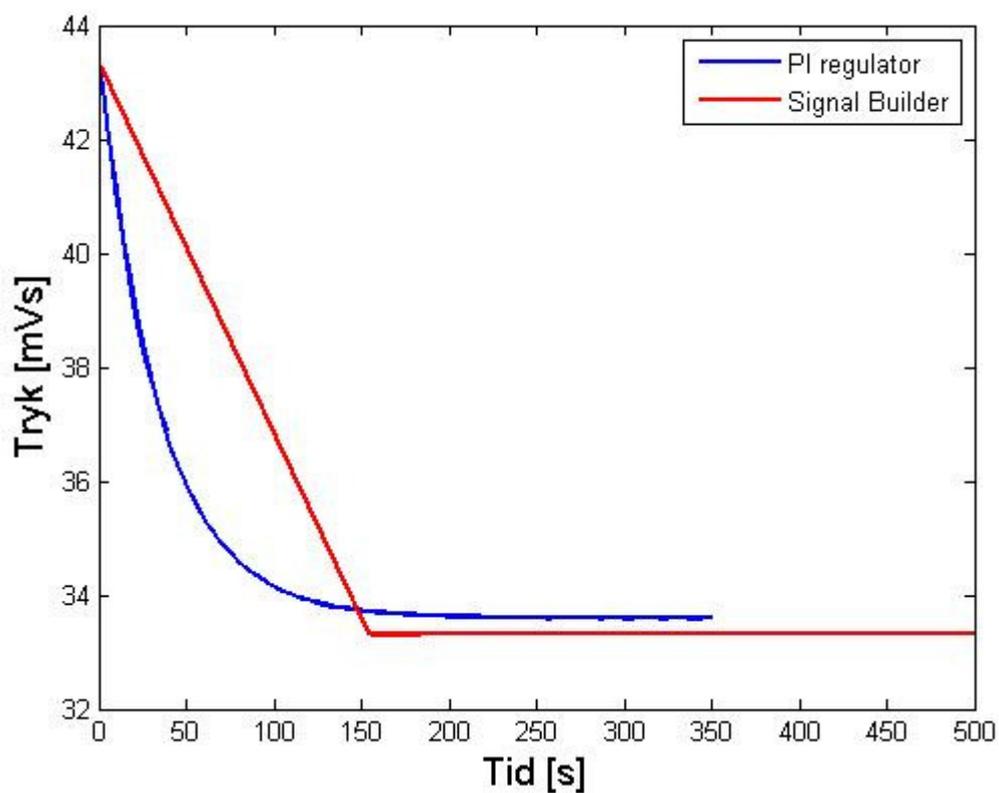
$$e(t) = -10 * e^{-t}$$

Modellen fører til open-loop-regulering og closed-loop-regulering.

Der udarbejdes to open-loop-reguleringsstrategier. Den bedste er med input fra en Signal Builder. Denne reguleringsstrategi opfylder begge designkriterier, nemlig at risetime skal være 135 s, og at overshoot ikke må overstige 5 %. Derudover er der udarbejdet en closed-loop-reguleringsstrategi. Den her fittede PI-regulator lever ikke op til designkriteriet med en risetime på 135 s. I diskussionen forsøges det at optimere på modellen med PI-regulatoren ved at indsætte en rampebegrænsning to forskellige steder i modellen. Men stik imod forventningen får rampebegrænsningen systemet til at blive hurtigere.

I diskussionen bliver det tydeligt, at den bedste strategi er open-loop-regulering med Signal Builder, men denne er ikke direkte implementerbar hos Aalborg Forsyning, Varme.

Sammenligningen fremgår af Figur 43:



Figur 43 viser sammenligningen mellem systemet med Pi-regulatoren og systemet med Signal Builder som input

Som det fremgår af figuren er den bedste løsning på problemformuleringen at indsætte en Signal Builder til at levere inputtet til systemet. Det ville derfor være interessant i samarbejde med Aalborg Forsyning, Varme at finde en metode til implementering af et input svarende til det, der leveres af Signal Builder.

## Perspektivering

Da det er ønskeligt for Aalborg Forsyning, Varme at få en generel løsning, var det interessant at undersøge, om denne regulator kunne anvendes til at opstartsregulere andre returpumper i systemet. Udgangspunktet kunne være en række forsøg, hvor regulatoren testes direkte i systemet.

Det kunne undersøges, hvorledes regulatoren ville agere, hvis denne blev gjort afhængig af flow og temperatur. Det kunne også være, at løsningen blev bedst, hvis selve modellen blev afhængig af flow og temperatur.

Endvidere var det interessant at udvikle regulatorer til fremløbspumperne. Derudover kunne det være gavnligt at udvikle en helt generel model til design af fremtidige regulatorer til nye pumpestationer i fjernvarmenettet hos Aalborg Forsyning, Varme.

Derudover er der andre systemer, hvor der er behov for at få udviklet tilsvarende regulatorer. Dansk Fjernvarmes Geotermiselskab er et af de firmaer, der kunne have gavn af en sådan.



## Bibliografi

Andersen, T. O., & Hansen, M. R. (2007). *Fluid Power Circuits, System Design and Analysis*. aalborg: Aalborg Universitet.

Dansk Fjernvarme. (20. Maj 2014). *Blåstemplet analyse lægger op til mere fjernvarme og nye politiske initiativer: pressemeddelelser: Vi mener: Dansk fjernvarme*. Hentede 15. september 2014 fra Dansk fjernvarmes hjemmeside: <http://www.danskfjernvarme.dk/vi-mener/pressemeddelelser/blaastemplet-analyse-laegger-op-til-mere-fjernvarme-og-nye-politiske-initiativer>

Energinet.dk. (30. september 2014). *Brændsler: Sider: Miljørapportering: Klima og miljø: Da: Energinet.dk*. Hentede 2. Oktober 2014 fra Energinet.dks hjemmeside: <http://energinet.dk/DA/KLIMA-OG-MILJOE/Miljoerapportering/Sider/Braendsler.aspx>

*Fjernvarme*. (2011). Hentede 12. September 2014 fra Infoside om fjernvarme: [www.fjernvarme.info](http://www.fjernvarme.info)

*Fjernvarme*. (2011). *Brændsler i varmesystemet: Fjernvarme*. Hentede 12. september 2014 fra Fjernvarmes hjemmeside: Kilde: <http://www.fjernvarme.info/Brændsler-i-varmesystemet.264.aspx>

fml.d. (2014). *Impellerpumpen: fml.d*. Hentede 12.. september 2014 fra fml.d.s hjemmeside: <http://www.fml.d.at/index.php?kat=105&n=Impellerpumpen>

Holm, B. (13.. Oktober 2014). Planlægger. (P. Kiersgaard, Interviewer)

*Kraftværk contra kraftvarmeværk: fjernvarme*. (2011). Hentede 12. september 2014 fra Fjernvarme: <http://www.fjernvarme.info/kraftværk-contra-kraftvarmeværk.323.aspx>

Larsen, T. (Nr.2. Vol 35 2007). Trykstød i pumpeledninger. *Spildevandsteknisk Tidsskrift*, s. 36-38.

m.fl., J. A. (2007). *Søfartens ABC*. Esbjerg: Iver C. Weilbach og Co.

Miljøstyrelsen. (1998-2011). *Publikationer: Miljøstyrelsen*. Hentede 12.. September 2014 fra Miljøstyrelsens hjemmeside: <http://www2.mst.dk/common/Udgivramme/Frame.asp?http://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2001/87-7944-820-8/html/kap01.htm>

Udskrift fra SRO. (2014). Aalborg, Danmark.

Aalborg Forsyning, Varme. (2014). *Grønt Regnskab for Aalborg Forsyning, Varme*. Aalborg: Aalborg Forsyning, Varme.

Aalborg Forsyning, Varme. (u.d.). *Hvad er fjernvarme: Om os:Varme: Aalborg Forsyning*. Hentede 12. September 2014 fra Aalborg Forsynings hjemmeside: <http://www.aalborgforsyning.dk/varme/om-os/hvad-er-fjernvarme.aspx>