

Louise Jivan Shah

Stratifikationsindløbsrør

Sagsrapport
BYG·DTU SR-02-23
2002

ISSN 1393-402x

Louise Jivan Shah

Stratifikationsindløbsrør

Department of Civil Engineering
DTU-building 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2002

Forord

I dette projekt undersøges et SOLVIS stratifikationsindløbsrør og en alternativ løsning på en stratificerende indløbsrørsløsning eksperimentelt i BYG.DTU's lagerprøvestand. Undersøgelserne udføres for Batec A/S.

Projektet er gennemført som en del af BYG•DTU's aktiviteter indenfor projektet "Assistance til solenergibrancen", J. nr. 51181/00-0088.

Projektet er finansieret af Energistyrelsen.

Projektgruppe:

Louise Jivan Shah, civ.ing., PhD
Peter Allen, gæsteprofessor
Simon Furbo, civ.ing., PhD
Lars Kæstel Jørgensen, elektronikmekaniker
Poul Dedenroth, maskinarbejder
Martin Dandanell, maskinarbejder
Anne Rasmussen, korrespondent

Resume

Der er i projektet undersøgt to stratifikationsindløbsrør. Det ene design er et markedsført tysk design, som er udviklet af det tyske firma SOLVIS-Solarsysteme GmbH. Det andet design er udviklet af professor Peter Allen, Dalhousie University, Canada, i forbindelse med dette projekt.

For begge stratifikationsrør er der udført to forsøgsserier bestående af 5 opvarmningsforsøg og 5 afkølingsforsøg for et forsøgsvarmelager.

For opvarmningsforsøgene er målet at en bedst mulig temperaturstratificering i lageret opbygges under forsøget.

For afkølingsforsøgene er målet at så lille en del af det varme lager som muligt afkøles af den indstrømmende væske under forsøget.

For opvarmningsforsøgene viste resultaterne at Peter Allen stratifikationsrøret er at foretrække for volumenstrømme mindre end 4 l/min, hvorimod Solvis stratifikationsrøret fungerer bedre for volumenstrømme over 4 l/min.

For afkølingsforsøgene viste resultaterne at en større del af varmelageret afkøles når Peter Allen røret anvendes end når Solvis røret anvendes. Dog tyder resultaterne på at forskellen bliver marginal for de helt små volumenstrømme.

Summary in English

Two stratification inlet pipes were examined in the project. One design is at marketed German design developed by the German company SOLVIS-Solarsysteme GmbH. The other is developed by professor Peter Allen, Dalhousie University, Canada, in connection with this project.

For both stratification inlet pipes two series of tests consisting of 5 heating tests and 5 cooling tests were carried out for a test heat storage.

The objective of the heating tests was to build up the best possible temperature stratification in the storage during the test.

The objective of the cooling tests was that as small part of the hot storage as possible is cooled by the fluid flowing in during the test.

The results of the heating tests showed that the Peter Allen-stratification pipe is preferable for volume flows smaller than 4 l/min, whereas the Solvis-stratification pipe functions better for volume flows over 4 l/min.

The results of the cooling tests showed that a larger part of the heat storage is cooled when the Peter Allen-pipe is used than when the Solvis-pipe is used. However, the results indicate that the difference is marginal for the quite small volume flow rates.

Indholdsfortegnelse

Forord	1
Resume.....	2
Summary in English	3
Indholdsfortegnelse.....	4
1 Indledning.....	5
2 Design af stratifikationsrør	7
2.1 Solvis stratifikationsrør	7
2.2 Peter Allen stratifikationsrør	8
3 Forsøgsopstilling	12
3.1 Lagerprøvestanden	12
3.2 Transparent beholder	13
3.3 Følerplaceringer	15
4 Forsøg	16
4.1 Opvarmningsforsøg med Solvis stratifikationsrøret	18
4.2 Opvarmningsforsøg med Peter Allen stratifikationsrøret	24
4.3 Afkølingsforsøg med Solvis stratifikationsrøret	30
4.4 Afkølingsforsøg med Peter Allen stratifikationsrøret	36
4.5 Sammenligning af stratifikationsrørene	42
4.5.1 Opvarmningsforsøg.....	42
4.5.2 Afkølingsforsøg	43
5 Konklusion	47

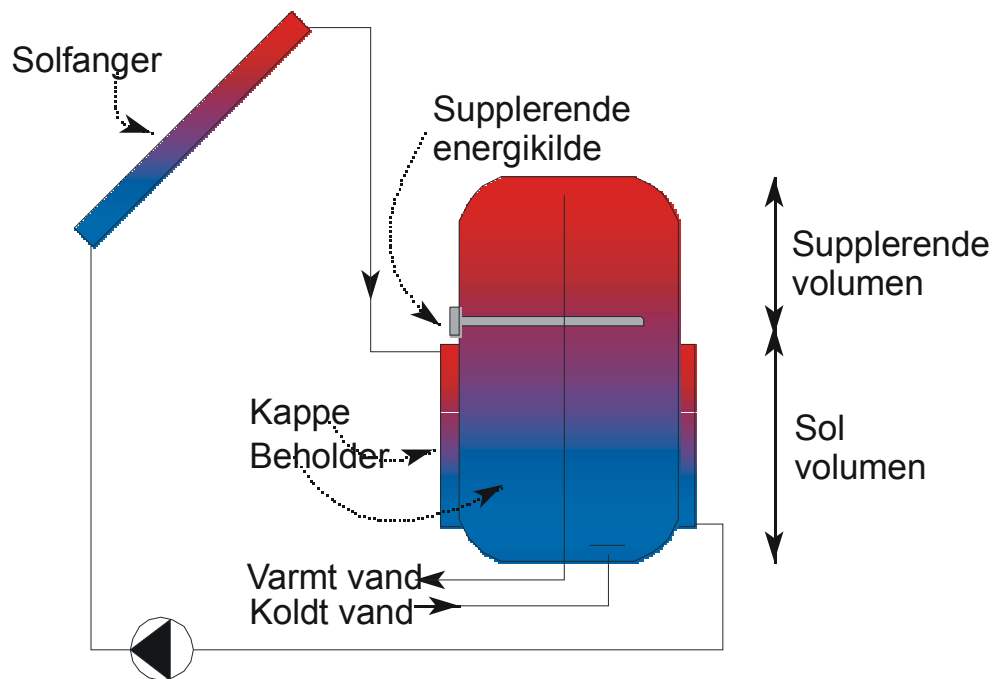
1 Indledning

Den vigtigste komponent i et solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning og til kombineret brugsvands- og rumopvarmning er varmelageret.

Ifølge termodynamikkens hovedsætninger skal den termiske stratificering være størst mulig for at opnå højst mulig systemeffektivitet. Således er det mere effektivt at have et varmelager med 20°C i bunden og 60°C i toppen end et varmelager med en ensartet temperatur på 40°C. I begge tilfælde er energiindholdet det samme, men mængden af brugbar energi (f.eks. over 45°C) er større i den stratificerede tank end i den miksede tank.

Oprettelse af termisk stratificering i solvarmebeholdere er vanskeligt, bl.a. fordi solfangervæskens temperaturniveau varierer meget da temperaturniveauet er afhængigt af vejret.

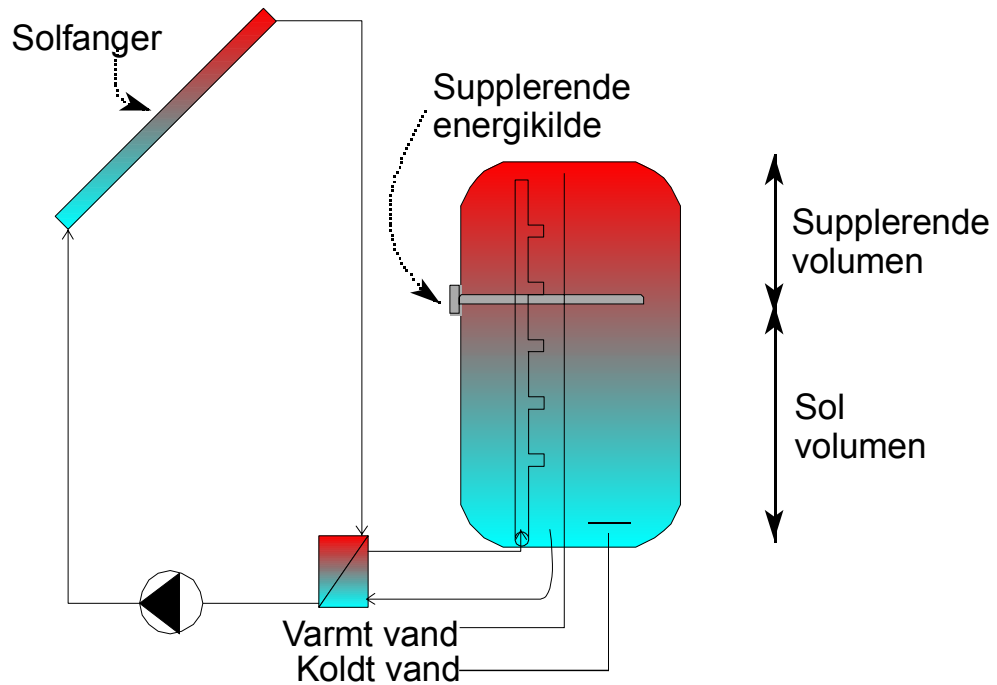
For små brugsvandsanlæg er det muligt at oprette en god temperaturstratificering ved anvendelse af kappebeholdere, se Figur 1. Årsagen er, at når solfangervæsken kommer ind i kappen falder væsken automatisk ned til det niveau hvor den omgivende væske har samme temperatur som den indkommende væske. Hvis den indkommende væske er varm afgives energien til brugsvandet i toppen af kappen, og hvis den indkommende væske er koldere afgives energien længere nede i kappen. Dermed oprettes temperaturstratificeringen.



Figur 1: Brugsvandsanlæg baseret på en kappebeholder.

For større solvarmeanlæg til f.eks. solvarmeanlæg til kombineret brugsvands- og rumopvarmning kan kappebeholdere ikke benyttes, da det varmeoverførende areal bliver for lille i forhold til de større lagervolumener. I stedet bruges ofte eksterne varmevekslere med stratifikationsrør som sørger for at temperaturlagdelingen

oprettes ved indkommende væskestrømme, se Figur 2. Princippet med stratifikationsrør er, at den indkommende væske strømmer ud af det udløb i stratifikationsrøret, hvor den omgivende væske har samme temperatur som den indkommende væske.



Figur 2: Brugsvandsanlæg baseret på en almindelig beholder med ekstern varmeveksler og stratifikationsrør med naturlig cirkulation.

Arbejdet i denne rapport omhandler oprettelse og opretholdelse af termisk stratificering ved anvendelse stratifikationsrør.

2 Design af stratifikationsrør

Der er i projektet undersøgt to stratifikationsrør. Det ene design er et markedsført tysk design, som er udviklet af det tyske firma SOLVIS-Solarsysteme GmbH. Det andet design er udviklet af professor Peter Allen, Dalhousie University, Canada, i forbindelse med dette projekt.

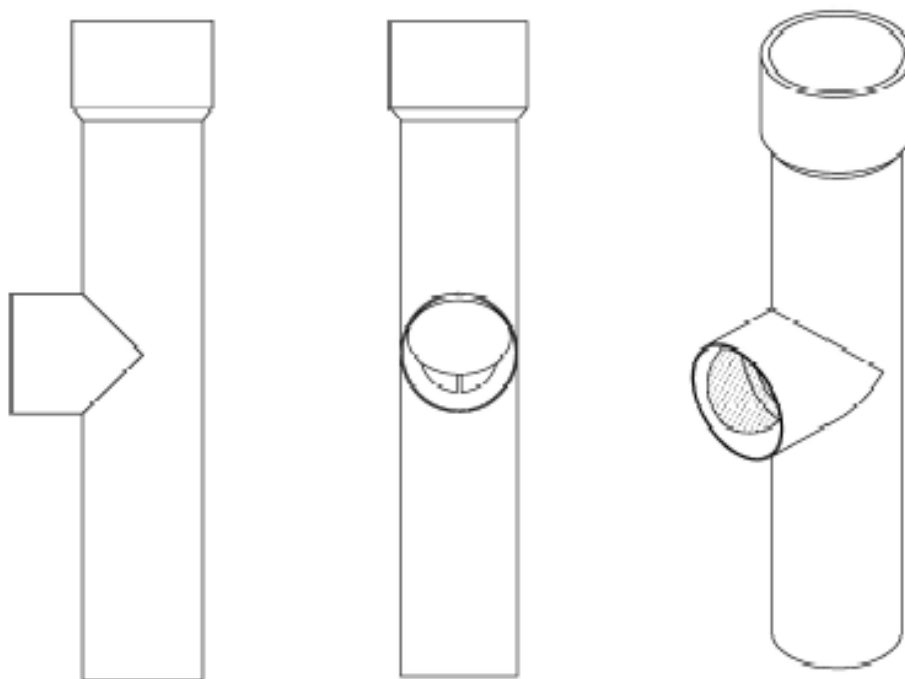
2.1 Solvis stratifikationsrør

Stratifikationsrøret er sammensat af et antal polypropylenrør som hvert er forsynet med en udløbsmulighed for returvandet fra varmeveksleren, jf. Figur 2. Rørene er sammensat så der er en udløbsmulighed for vandet for hver 30. cm i hele rørets udstrækning. Rørenes indre og ydre diameter er hhv. 53 og 60 mm.

Hvert udløb er forsynet med en klap. Princippet med klapperne er, at de er lukkede så længe der intet flow er igennem varmeveksleren og dermed igennem indløbsrøret. Når der er et lavt flow igennem varmeveksleren og dermed igennem indløbsrøret åbner den klap, som resulterer i det laveste totale tryktab i varmevekslingskredsen, sig. Massefyldeforskellene mellem vandet inden for og uden for hver enkelt klap bestemmer hvilken klap der åbnes.

Designet af de patenterede indløbsrør og klapper skal sikre at vandet fra indløbsrøret føres ud i beholderen i et niveau med en vandtemperatur tæt på temperaturen af det indstrømmende vand. Herved opbygges en stor temperaturlagdeling i beholderen under varmetilførsel fra solfangerne.

Figur 3 viser principskitser og Figur 4 viser fotos af SOLVIS indløbsrøret.



Figur 3: Principskitser af et SOLVIS indløbsrør.



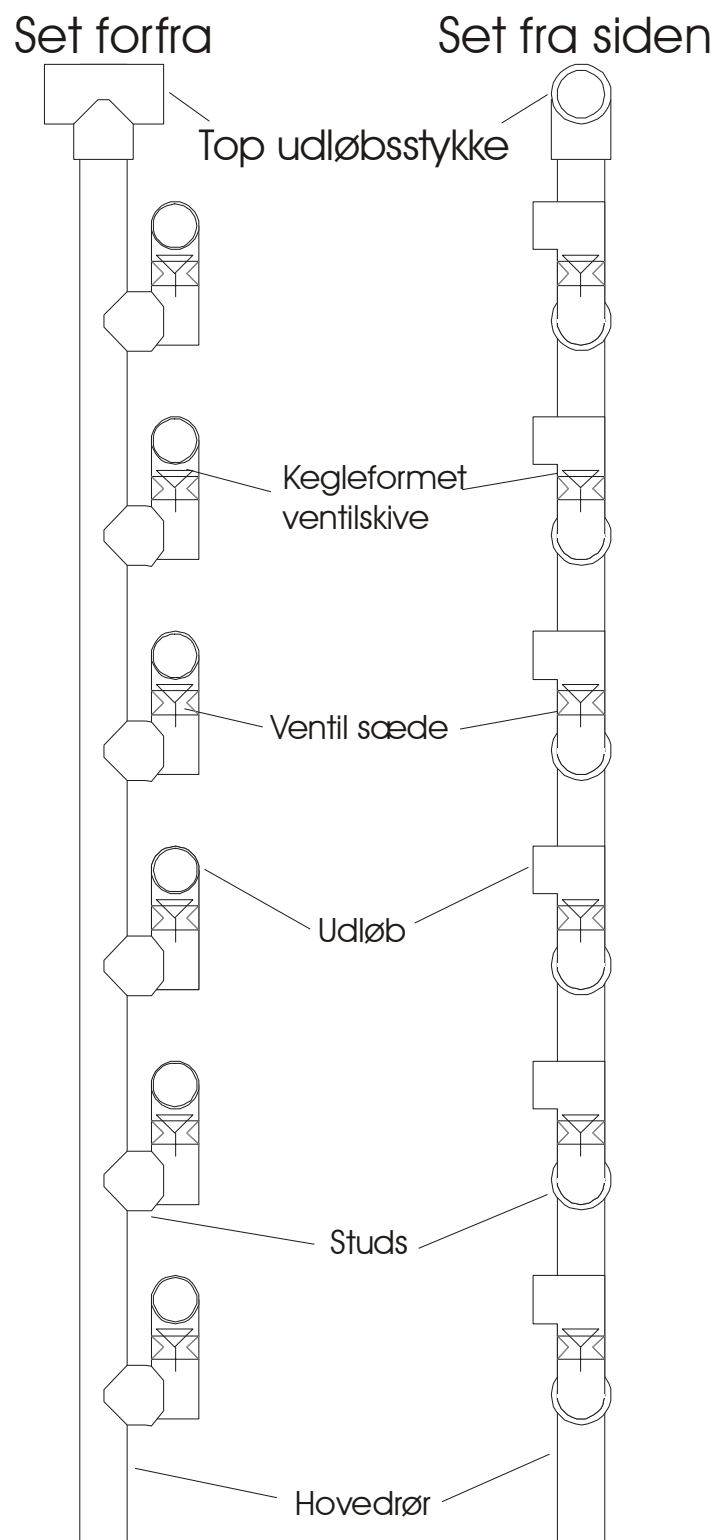
Figur 4: SOLVIS indløbsrør (til venstre og i midten) og 5 sammensatte SOLVIS indløbsrør (til højre).

2.2 Peter Allen stratifikationsrør

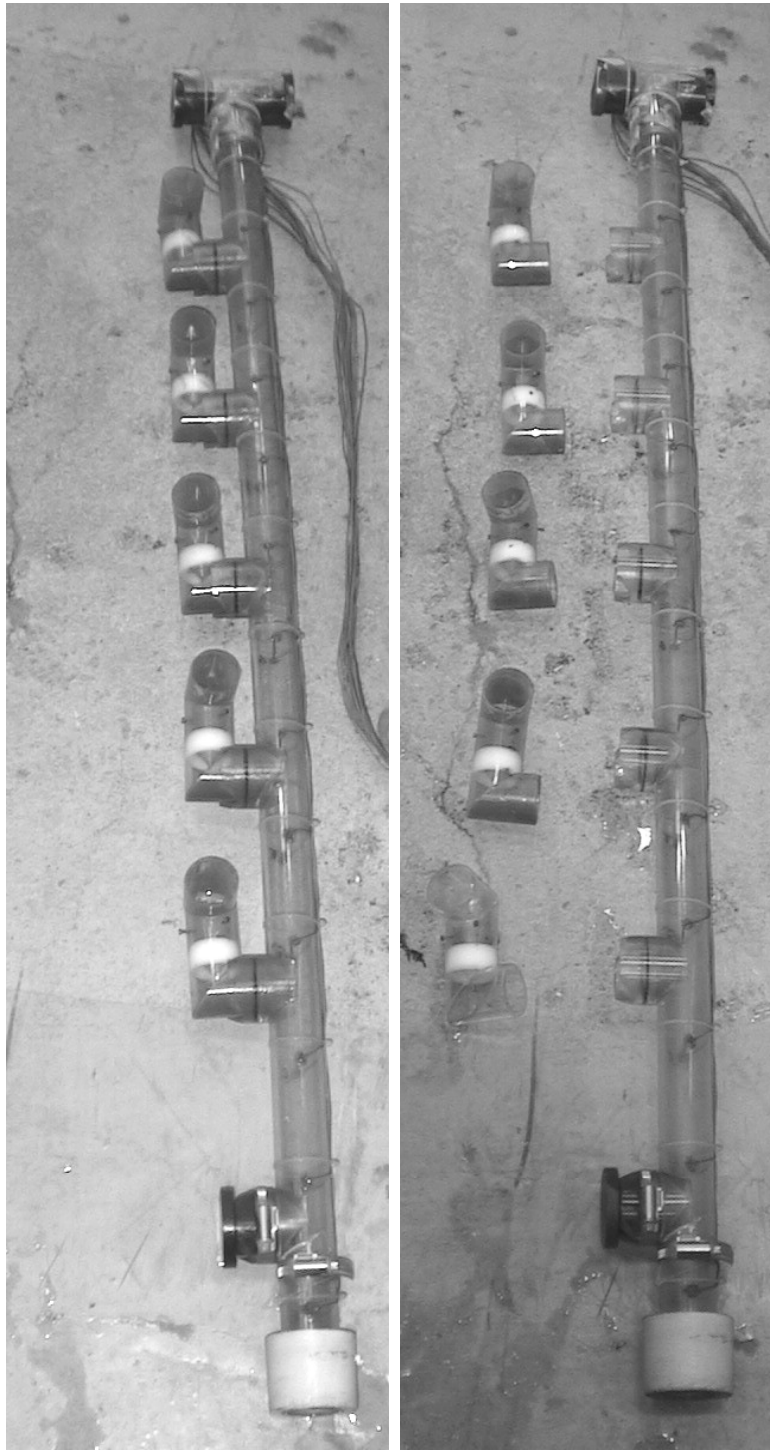
Stratifikationsrøret består af et gennemgående indløbsrør, som er forsynet med 6 udløbsåbninger. I hver åbning er det monteret en slags kontraventil. Kontraventilen består af en tynd kegleformet plasticskive (som et kræmmerhus), som hviler i et konisk sæde, jf Figur 5. Stratifikationsrøret er udformet således, at der er en udløbsmulighed for vandet for hver 18. cm i hele rørets udstrækning. Rørenes indre og ydre diameter er hhv. 36 og 40 mm.

Princippet med kontraventilerne er, at de er lukkede så længe der intet flow er igennem varmeveksleren og dermed igennem indløbsrøret. Dvs. at den kegleformede skive hviler i det konisk formede sæde. Når der er et lavt flow igennem varmeveksleren og dermed igennem indløbsrøret hæver den kegleformede skive, som resulterer i det laveste totale tryktab i varmevekslingskredsen, sig. Massefyldeforskellene mellem vandet inden for og uden for hver enkelt udløb bestemmer hvilket udløb der åbnes.

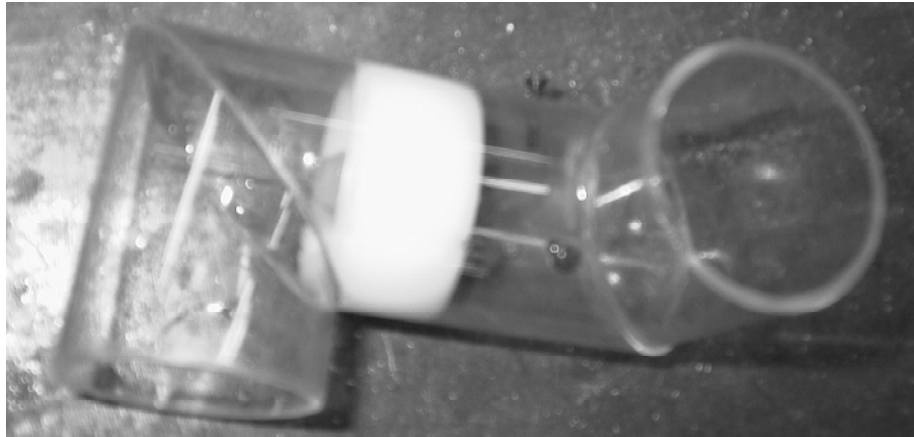
Designet af indløbsrøret og kontraventilerne skal sikre at vandet fra indløbsrøret føres ud i beholderen i et niveau med en vandtemperatur tæt på temperaturen af det indstrømmende vand. Herved opbygges en stor temperaturlagdeling i beholderen under varmetilførsel fra solfangerne.



Figur 5: Principkitser af Peter Allen stratifikationsrør.



Figur 6: Peter Allen stratifikationsrøret

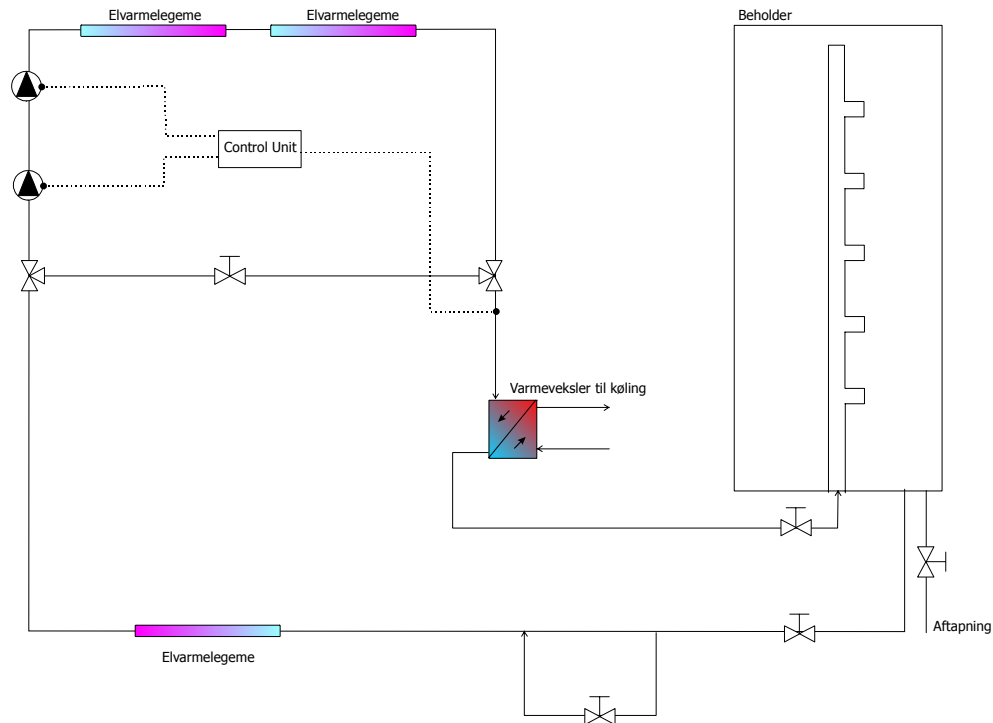


Figur 7: Udløbene i Peter Allen stratifikationsrøret.

3 Forsøgsopstilling

3.1 Lagerprøvestanden

Lagerprøvestanden består af en opvarmningskreds som inkluderer tre elvarmelegemer. Disse styres således at en konstant fremløbstemperatur og en konstant volumenstrøm kan holdes. Desuden er der mulighed for køling, via en pladevarmeveksler i fremløbskredsen, hvis en lav fremløbstemperatur ønskes. En principskitse af lagerprøvestanden er vist i Figur 8.



Figur 8: Principskitse af lagerprøvestanden.

Ved prøvninger i prøvestanden måles følgende størrelser:

- Fremløbstemperatur.
- Returtemperatur.
- Volumenstrøm
- 9 temperaturer inde i beholderen.
- 6-7 temperaturer i stratifikationsrøret.
- Omgivelsernes temperatur.

Temperaturerne måles ved hjælp af kobber/konstantan termoelementer (Type TT). Temperaturforskellen i solfangerkreds og tappekreds måles med termosøjler med 5 tråde. Herved opnås større målenøjagtighed. Målepunkterne i væskekrebsene er placeret i dykrør, således at der er ét dykrør til hver tråd. Dermed bliver reaktionstiden hurtigst. Termoelementerne inde i beholderen er placeret i et glasrør, som er ført ind i tanken fra bunden.



Figur 10: Den transparente beholder.

3.3 Følerplaceringer

Temperaturlagdeling i beholderen måles med ni termoelementer, hvis placering fremgår af Tabel 1. I Solvis stratifikationsrøret måles temperaturen i fem niveauer i hovedrøret og i Peter Allen stratifikationsrøret måles temperaturen i syv niveauer i hovedrøret. Placeringerne fremgår af hhv. Tabel 2 og Tabel 3.

Betegnelse	Afstand fra bund
T1 (top)	1210
T2	1070
T3	930
T4	790
T5	650
T6	510
T7	370
T8	230
T9 (bund)	90

Tabel 1: Følerplacering i den transparente beholder.

Betegnelse	Afstand fra bund
Solvis_top	1200
Solvis_2	1140
Solvis_3	995
Solvis_4	705
Solvis_5	415
Solvis_bund	125

Tabel 2: Følerplacering i Solvis stratifikationsrøret.

Betegnelse	Afstand fra bund
PA_top	1220
PA_6	1025
PA_5	850
PA_4	675
PA_3	500
PA_2	325
PA_bottom	150

Tabel 3: Følerplacering i Peter Allen stratifikationsrør.

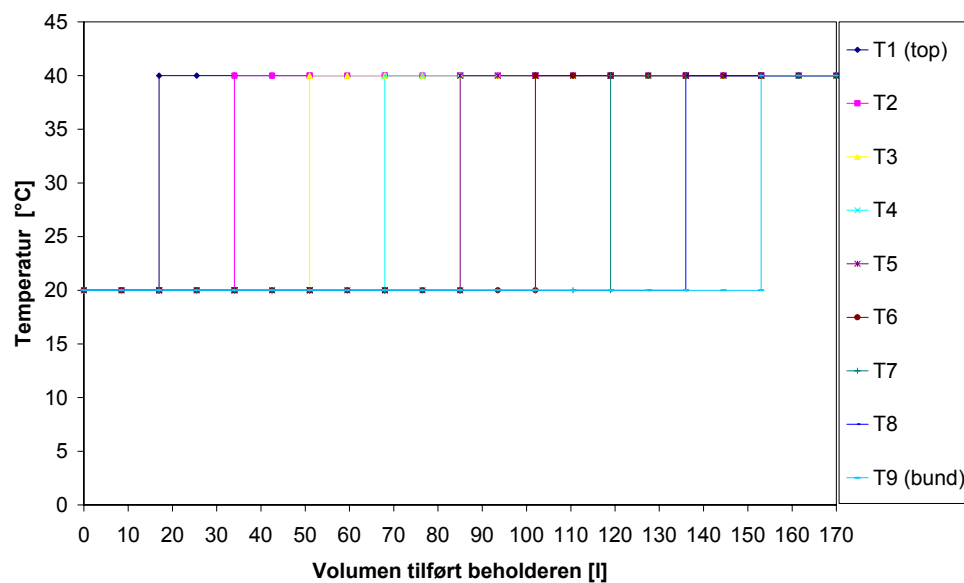
4 Forsøg

For begge stratifikationsrør er der udført to forsøgsserier, nemlig:

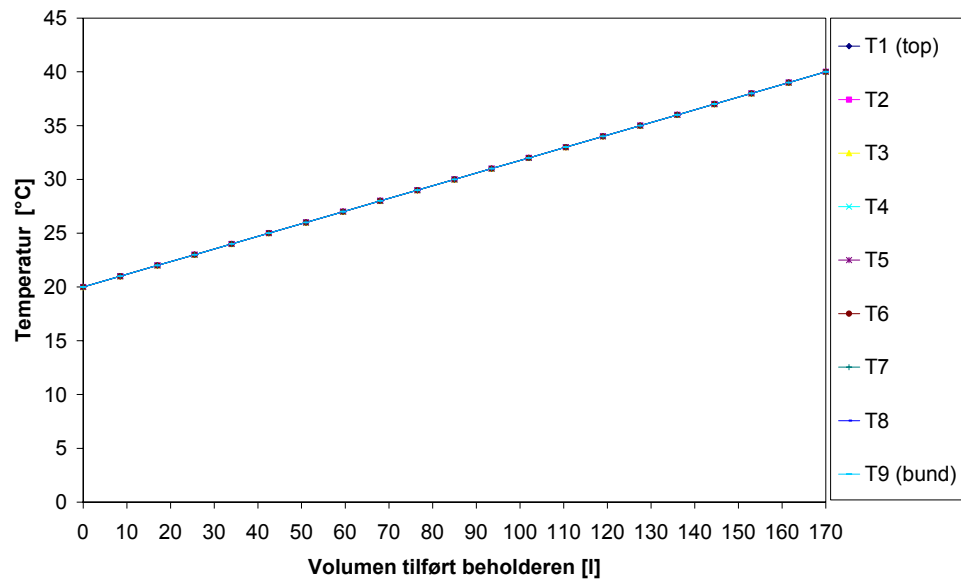
- Opvarmningsforsøg
- Afkølingsforsøg

Forsøgene er gennemført for forskellige volumenstrømme.

I opvarmningsforsøgene startes med en kold beholder. Med en konstant volumenstrøm med en varm fremløbstemperatur opvarmes beholderen til en konstant varm temperatur via stratifikationsrøret. Hvis opvarmningen er ideel, med højest mulig lagdeling (og uden varmetab til omgivelser samt nedadrettet varmeledning) vil temperaturudviklingen i beholderen se ud som i Figur 11. Hvis stratifikationsrøret overhovedet ikke virker, og der er fuld opblanding, så vil temperaturudviklingen i beholderen se ud som i Figur 12. Det er således klart, at jo mere "lodrette" og "adskilte" kurverne er, des bedre opbygning af temperaturstratificeringen i beholderen er der tale om.

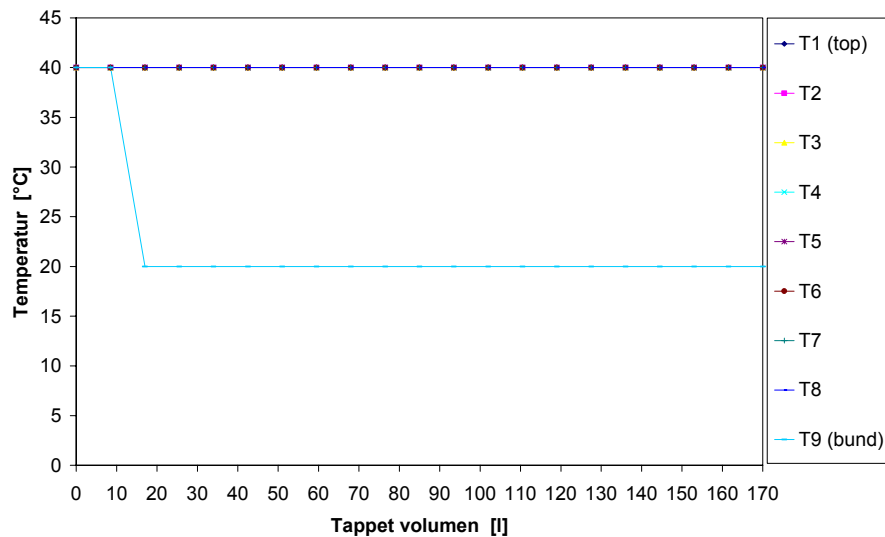


Figur 11: Ideel opvarmning med en fremløbstemperatur på 40°C og med en 20 °C kold beholder som udgangspunkt.

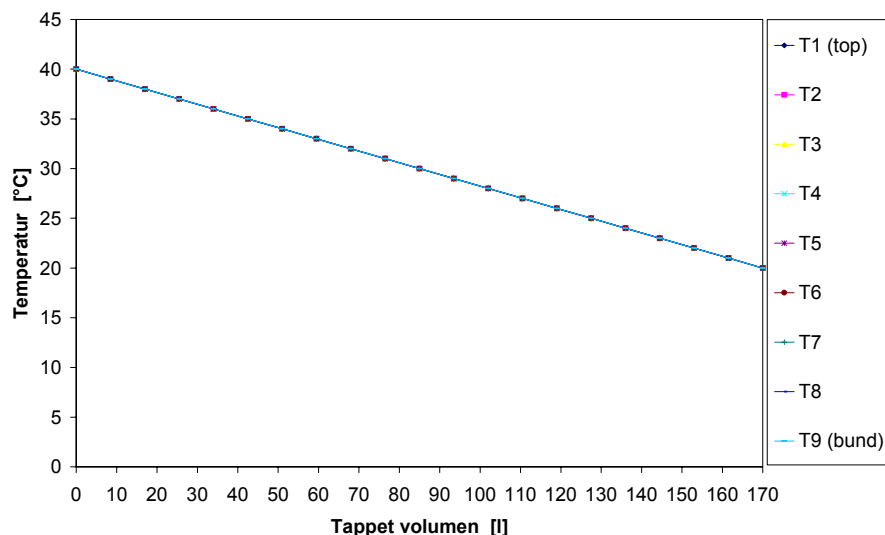


Figur 12: "Worst case" opvarmning med en fremløbstemperatur på 40°C og med en 20 °C kold beholder som udgangspunkt.

I afkølingsforsøgene startes med en varm beholder. Med en konstant volumenstrøm føres kold væske til lageret via stratifikationsrøret. Hvis afkølingsforsøget er ideelt, med mindst mulig opblanding (og uden varmetab til omgivelser samt nedadrettet varmeledning) vil temperaturudviklingen i beholderen se ud som i Figur 13. Årsagen til at temperaturen nederst i beholderen reduceres er, at det nederste udløb vil være placeret et stykke oppe i beholderen. Hvis stratifikationsrøret overhovedet ikke virker, og der er fuld opblanding, så vil temperaturudviklingen i beholderen se ud som i Figur 14. Det er således klart, at jo mere adskilte kurverne for bunden og toppen af lageret er, des bedre opbygning af temperaturstratificeringen i beholderen er der tale om.



Figur 13: Ideelt afkølingsforsøg med en fremløbstemperatur på 20°C og med en 40 °C varmt beholder som udgangspunkt.



Figur 14: "Worst case" afkølingsforsøg med en fremløbstemperatur på 20°C og med en 40 °C varm beholder som udgangspunkt.

4.1 Opvarmningsforsøg med Solvis stratifikationsrørret

Der er i alt foretaget 5 opvarmningsforsøg med volumenstrømmene 2 l/min, 4 l/min, 5 l/min, 8 l/min og 10 l/min. Ved starten af forsøgene er lageret koldt, ca. 20°C. Med en rimelig konstant fremløbstemperatur på ca. 35°C opvarmes lageret via stratifikationsrørret. Forsøget afsluttes efter at hele lagervolumenet er udskiftet – dvs. når 170 l er tilført.

Figur 15 - Figur 16 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrørret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.

Figur 17 - Figur 18 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrørret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.

Figur 19 - Figur 20 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrørret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 5 l/min.

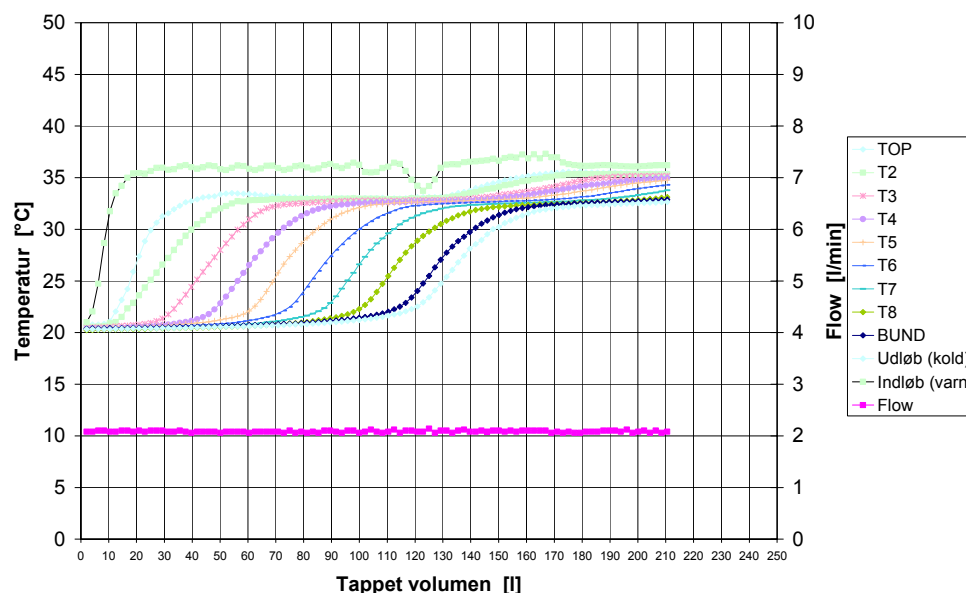
Figur 21 - Figur 22 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrørret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.

Figur 23 - Figur 24 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrørret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 10 l/min.

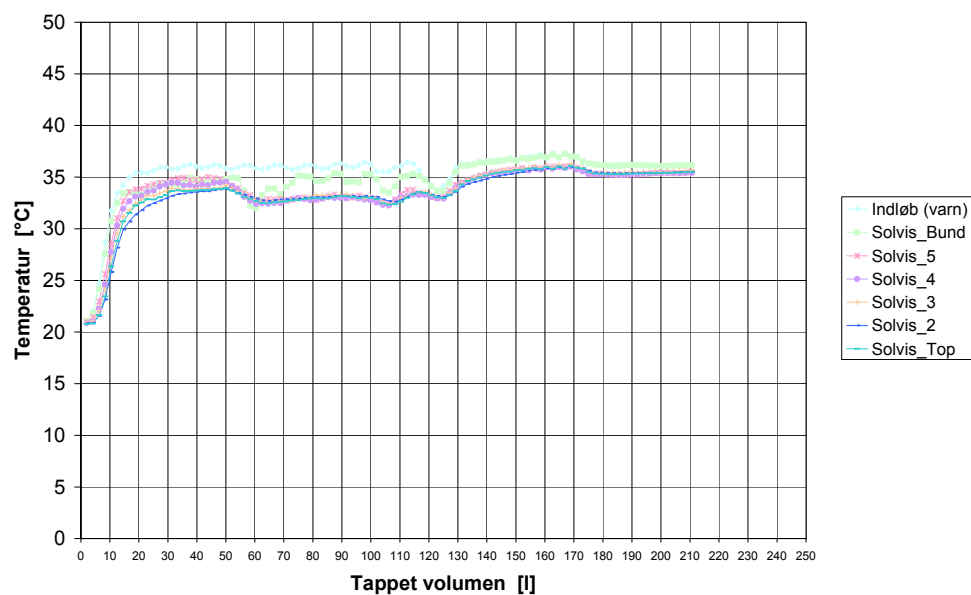
Figur 15, Figur 17, Figur 19, Figur 21 og Figur 23 viser at for alle volumenstrømme bliver temperaturlagdelingen opbygget under forsøget. Figureerne viser desuden, at i den første del af forsøget ligger den højeste temperatur i lageret 2-4 K under indløbstemperaturen. Forskellen er størst for den mindste volumenstrøm og for den største volumenstrøm (Figur 15 og Figur 23).

Figur 16, Figur 18, Figur 20, Figur 22 og Figur 24 viser, at temperaturen i toppen af stratifikationsrøret (Solvis_2, Solvis_Top) er lavere end indløbstemperaturen. Denne forskel er størst for den laveste volumenstrøm (Figur 16) og mindst for den højeste volumenstrøm (Figur 24).

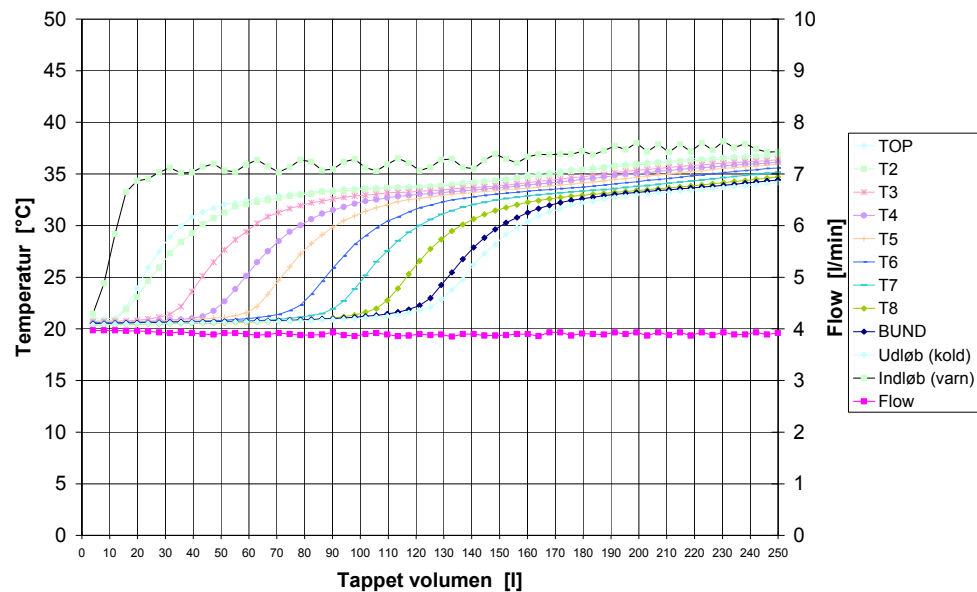
Overordnet set tyder det altså på, at der er størst opblanding i lageret for de helt små og de helt store volumenstrømme. Dette vil nærmere blive diskuteret i afsnit 4.5.



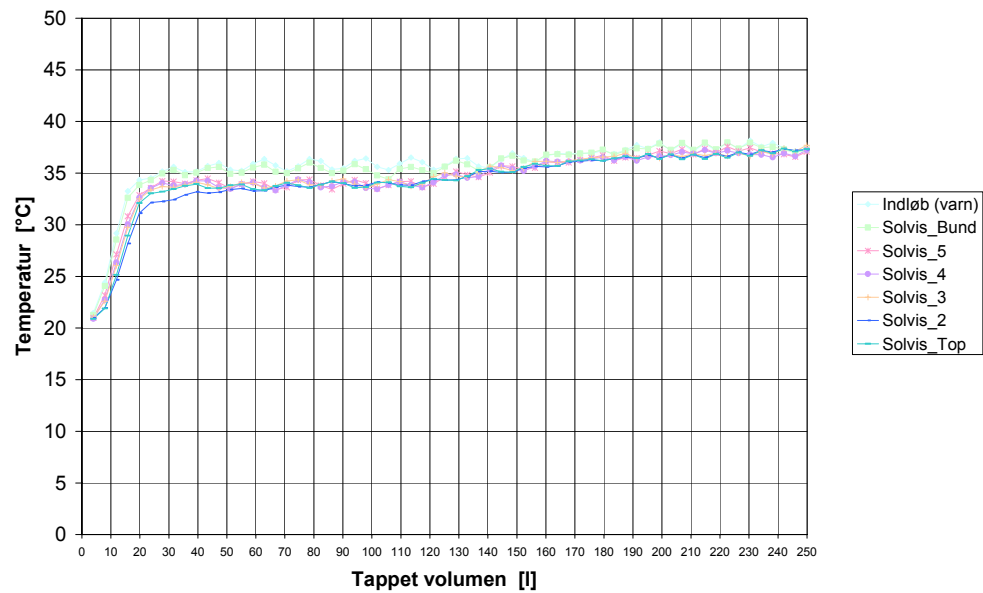
Figur 15: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



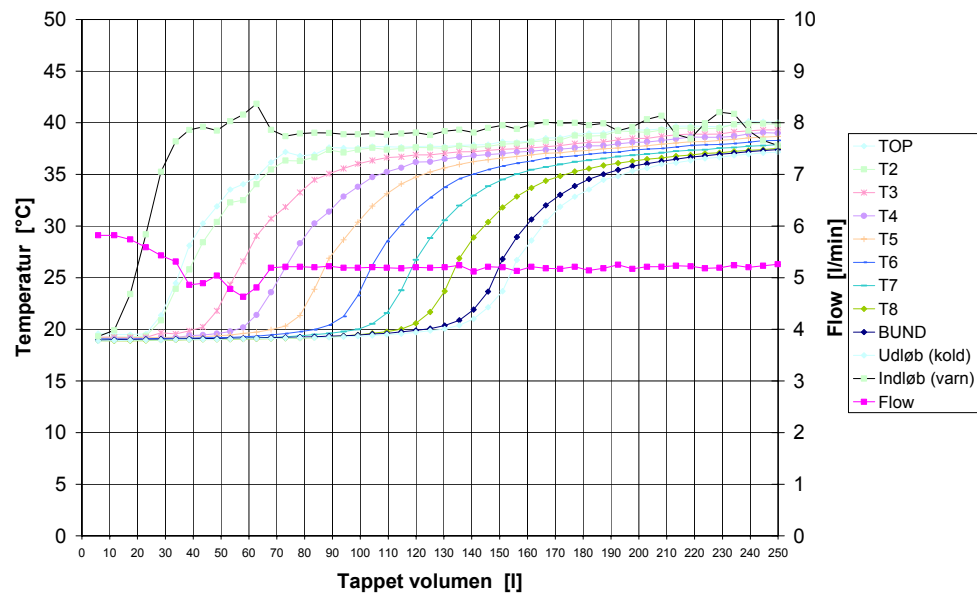
Figur 16: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



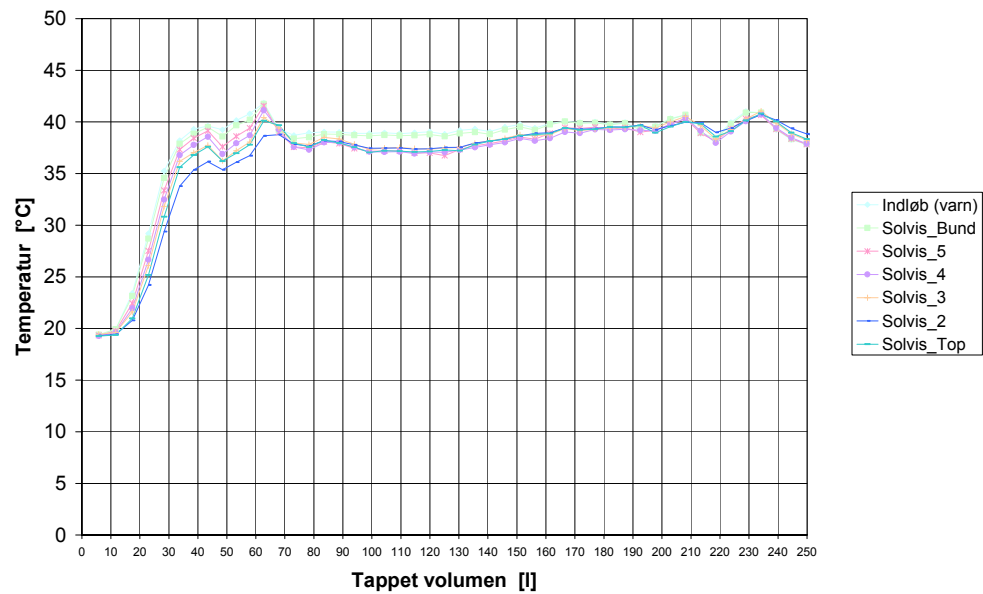
Figur 17: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



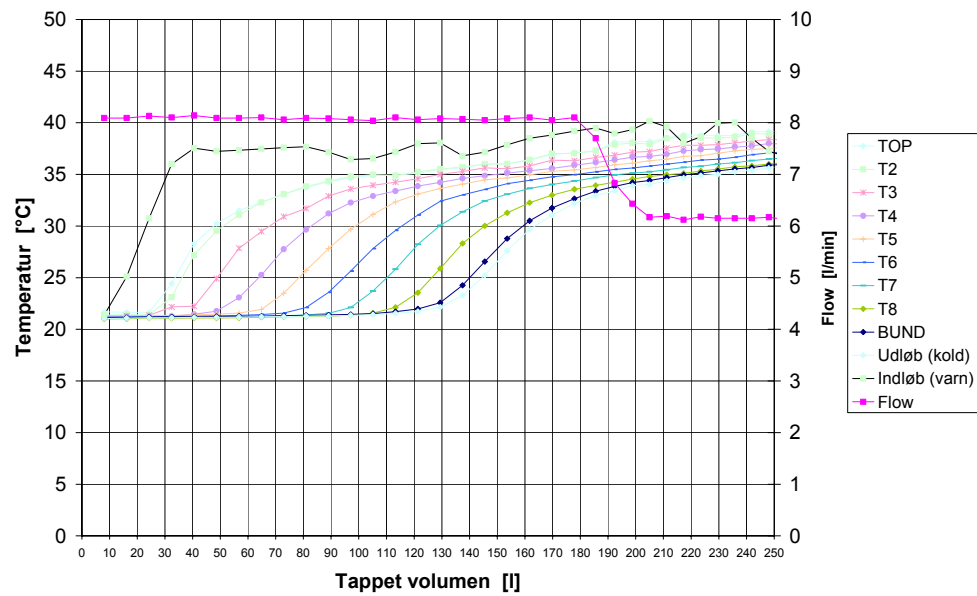
Figur 18: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



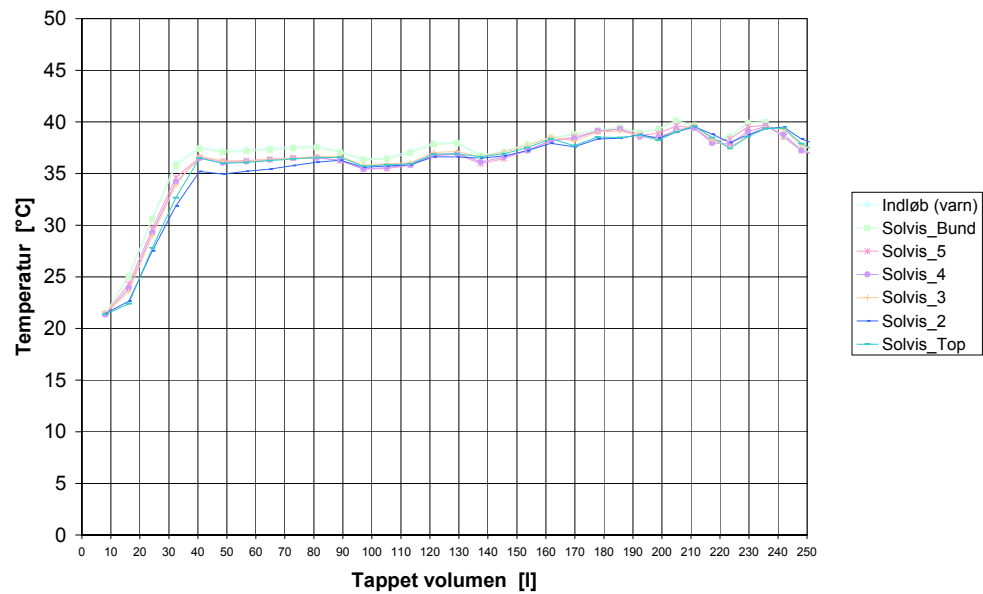
Figur 19: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 5 l/min.



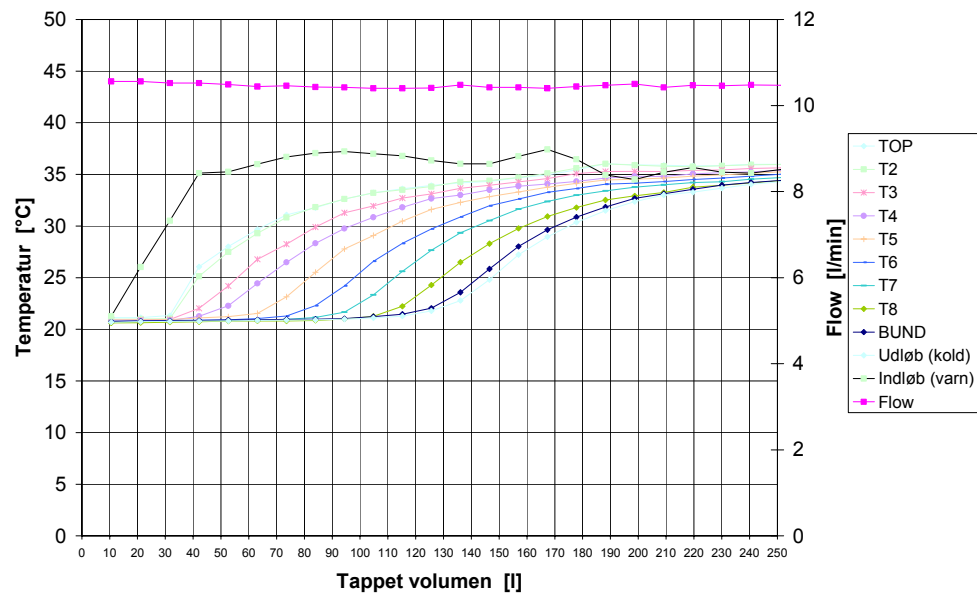
Figur 20: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 5 l/min.



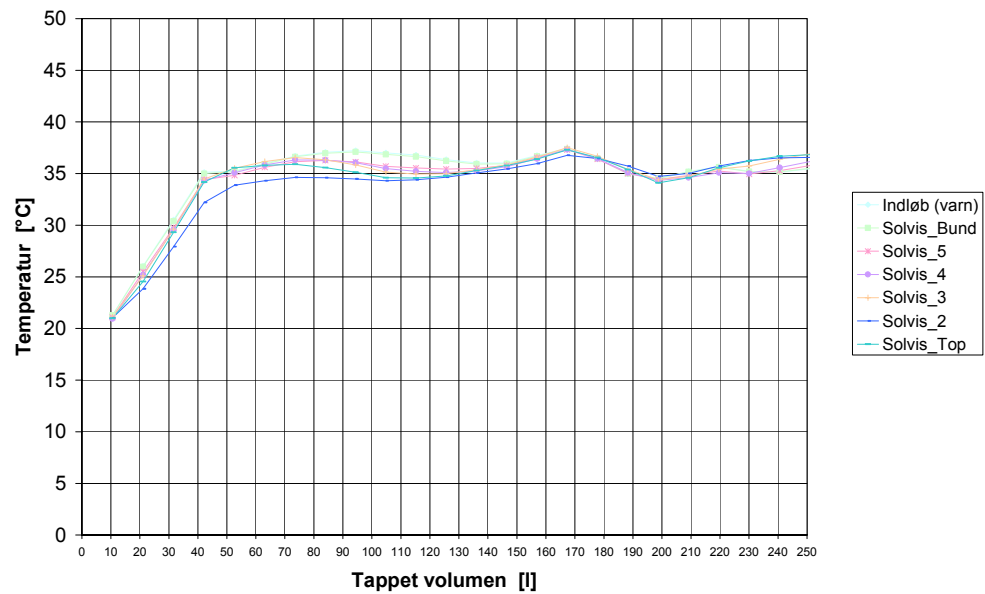
Figur 21: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.



Figur 22: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.



Figur 23: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på godt 10 l/min.



Figur 24: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på godt 10 l/min.

4.2 Opvarmningsforsøg med Peter Allen stratifikationsrøret

Der er i alt foretaget 5 opvarmningsforsøg med volumenstrømmene 1 l/min, 2 l/min, 4 l/min, 6 l/min og 8 l/min. Ved starten af forsøgene er lageret koldt, ca. 20°C. Med en rimelig konstant fremløbstemperatur på ca. 35°C opvarmes lageret via stratifikationsrøret.

Forsøget afsluttes efter at det anvendte lagervolumen er udskiftet. I dette tilfælde er lageret kun fyldt op til lige over det øverste udløb i Peter Allen stratifikationsrøret, hvilket svarer til ca. 133 l.

Dermed er forsøgsbetingelserne ens for de to stratifikationsrør, idet lageret også var fyldt op til lige over det øverste udløb i Solvis stratifikationsrøret, hvilket svarer til de 170 l.

Figur 25 - Figur 26 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 1 l/min.

Figur 27 - Figur 28 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.

Figur 29 - Figur 30 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.

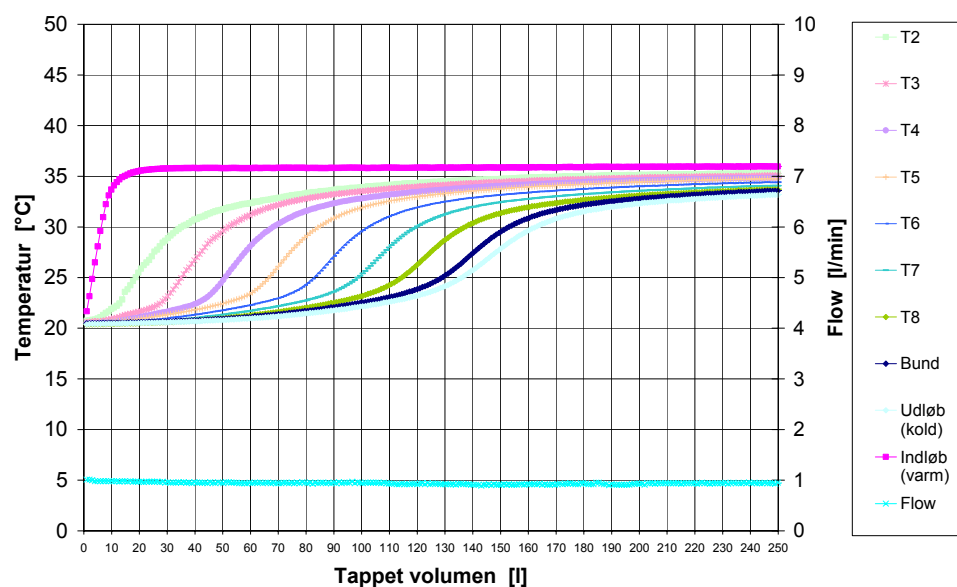
Figur 31 - Figur 32 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 6 l/min.

Figur 33 - Figur 34 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøget med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.

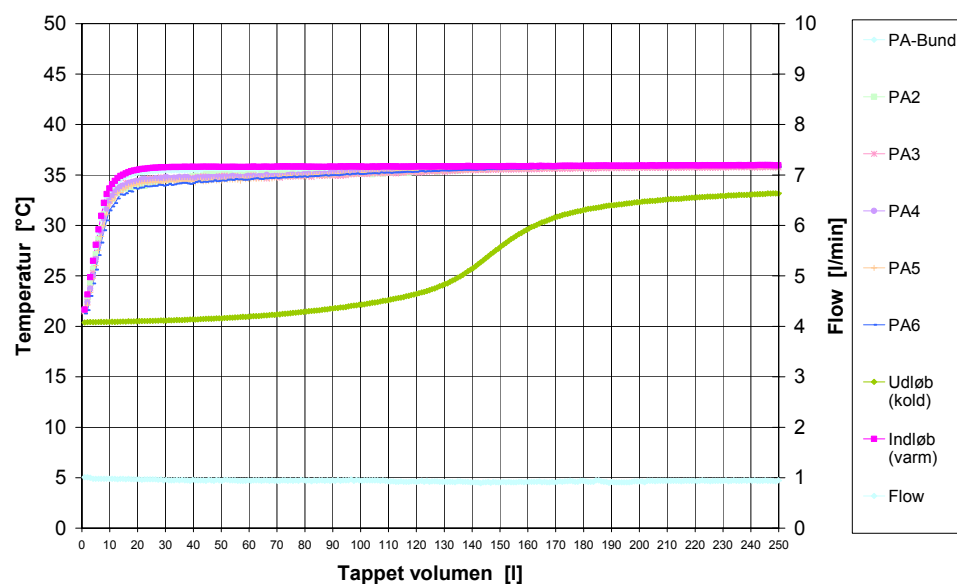
Figur 25, Figur 27, Figur 29, Figur 31 og Figur 33 viser at for alle volumenstrømme bliver temperaturlagdelingen opbygget under forsøget. Dog er det tydeligt, at lagdelingen bliver mindre og mindre ved stigende volumenstrømme.

Figur 26, Figur 28, Figur 30, Figur 32 og Figur 34 viser, at temperaturen i stratifikationsrøret er meget nær indløbstemperaturen.

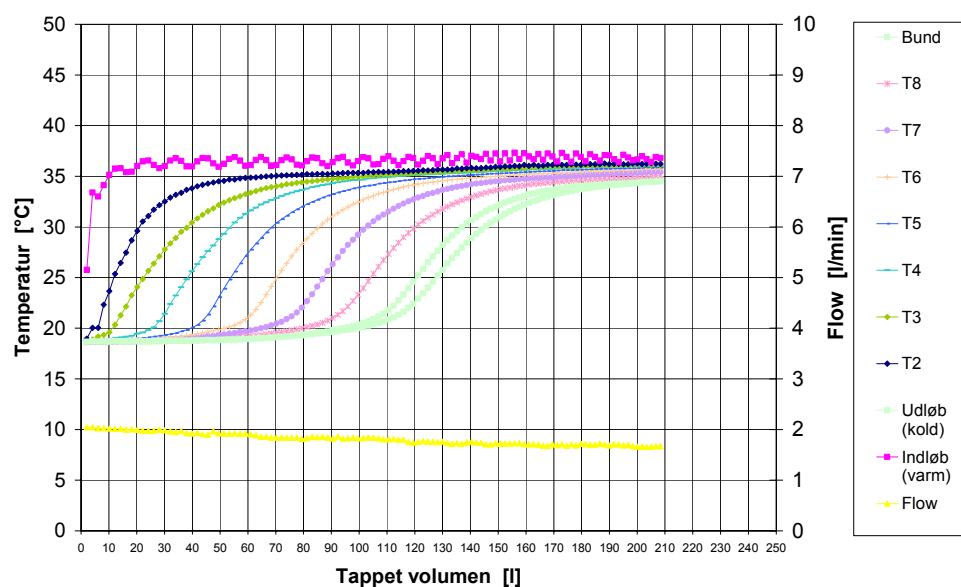
Overordnet set tyder det altså på, at opblandingen i lageret stiger med stigende volumenstrøm. Dette vil nærmere blive diskuteret i afsnit 4.5.



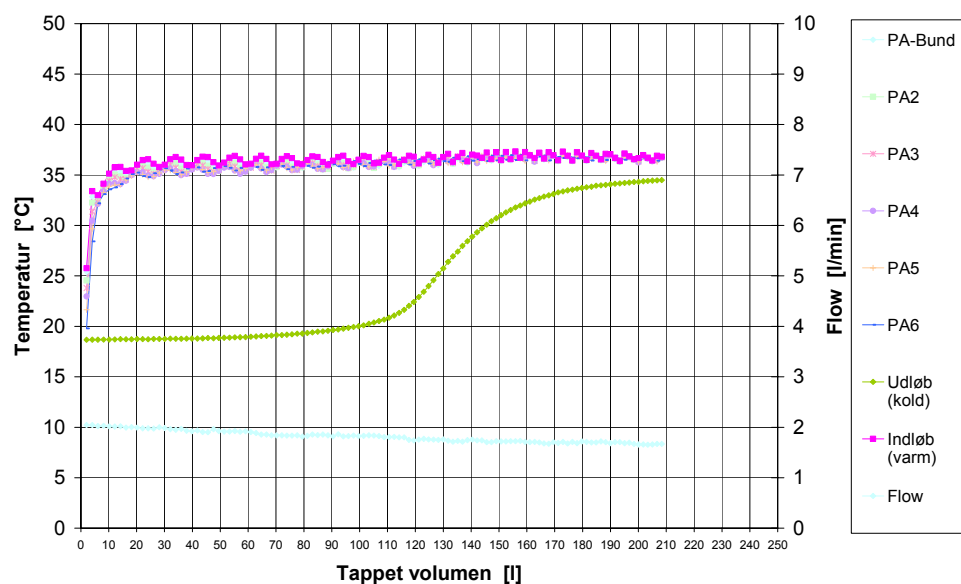
Figur 25: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 1 l/min.



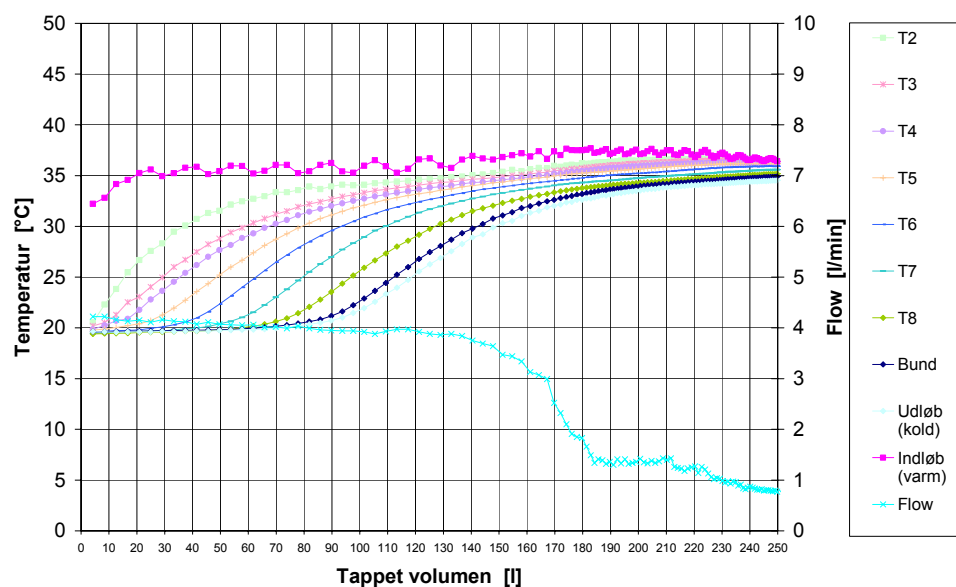
Figur 26: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 1 l/min.



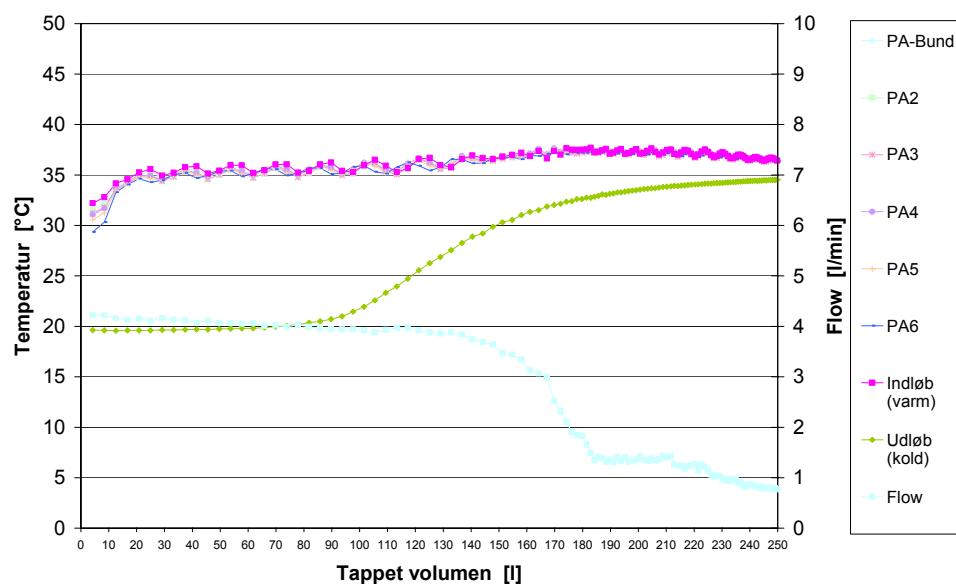
Figur 27: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



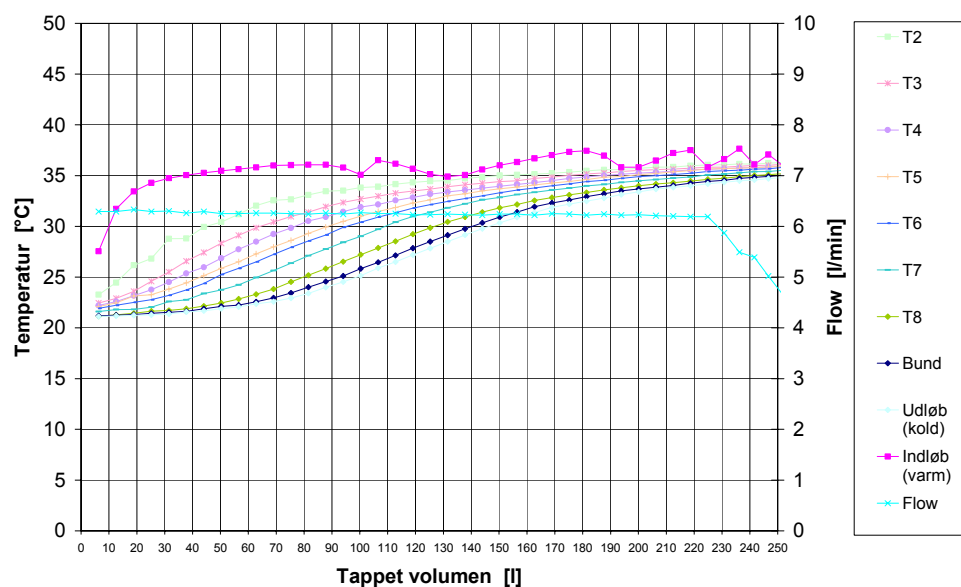
Figur 28: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



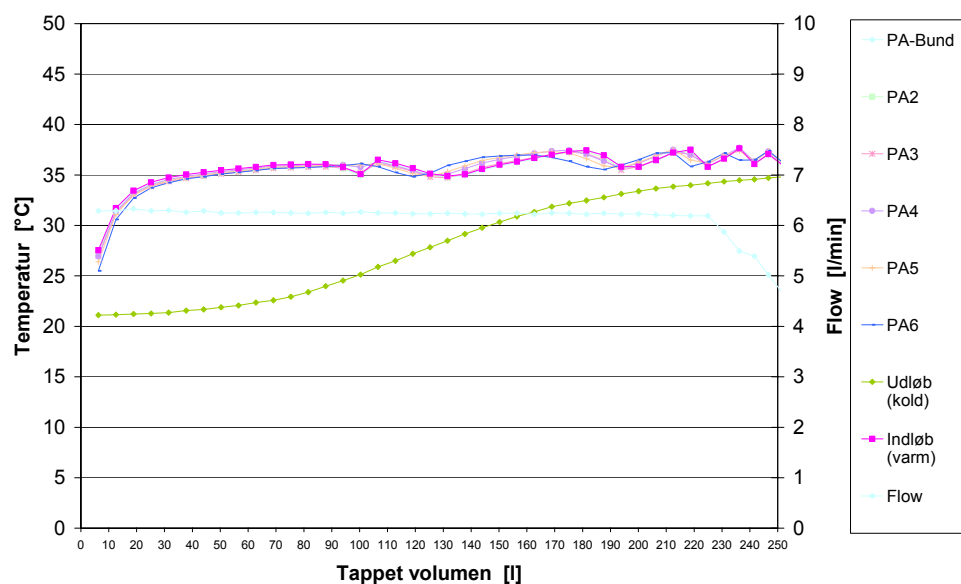
Figur 29: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



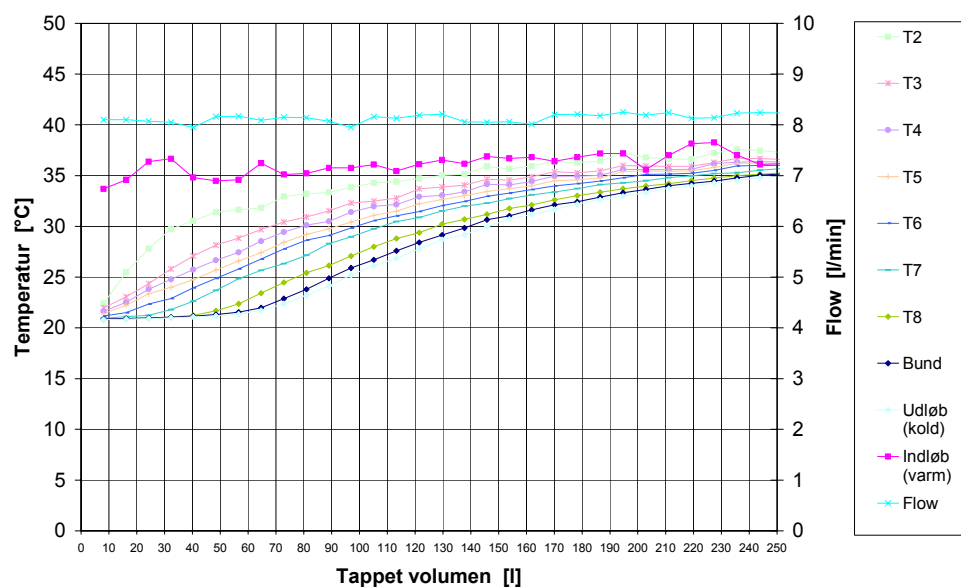
Figur 30: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



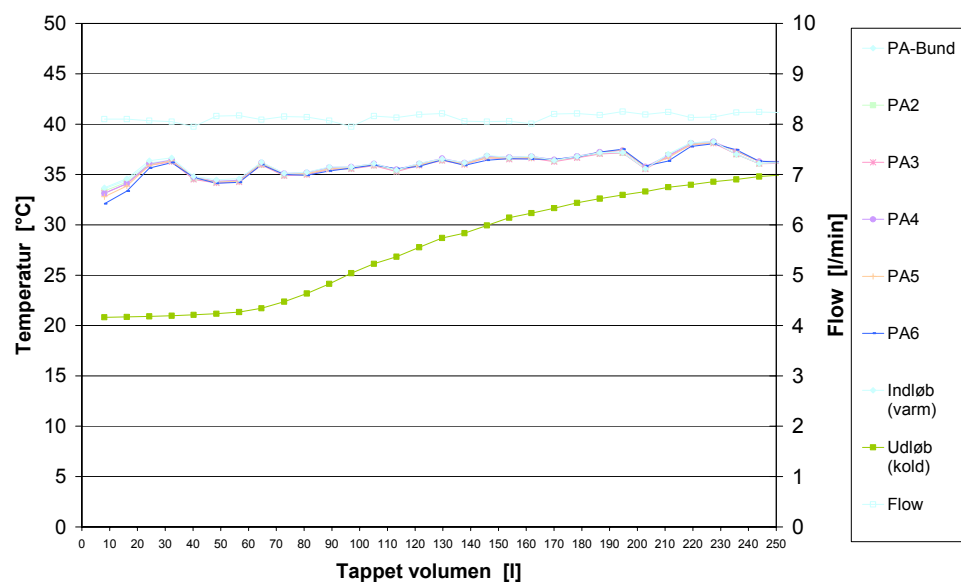
Figur 31: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på godt 6 l/min.



Figur 32: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på godt 6 l/min.



Figur 33: Temperaturer i beholderen under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.



Figur 34: Temperaturer i stratifikationsrøret under opvarmningsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.

4.3 Afkølingsforsøg med Solvis stratifikationsrøret

Der er i alt foretaget 5 afkølingsforsøg med volumenstrømmene 2 l/min, 4 l/min, 6 l/min, 8 l/min og 10 l/min. Ved starten af forsøgene er lageret varmt, ca. 50°C. Med en lav fremløbstemperatur på omkring 20°C afkøles lageret via stratifikationsrøret. Forsøget afsluttes efter at 1000 l er strømmet igennem lageret.

Som tidligere nævnt er målet, at afkølingen kun påvirker den del af lageret der er under det nederste udløb i stratifikationsrøret.

Figur 35 - Figur 36 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.

Figur 37 - Figur 38 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.

Figur 39 - Figur 40 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 6 l/min.

Figur 41 - Figur 42 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.

Figur 43 - Figur 44 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 10 l/min.

For de mindste volumenstrømme, op til 4 l/min jf. Figur 35 og Figur 37, ses det, at temperaturlagdelingen i lageret påvirkes op til føler T7, hvilket svarer til mindst 37 cm fra beholderens bund.

For volumenstrømmene 6 l/min og 8 l/min (Figur 39, Figur 41) ses det, at temperaturlagdelingen i lageret påvirkes op til føler T5, hvilket svarer til mindst 51 cm fra beholderens bund.

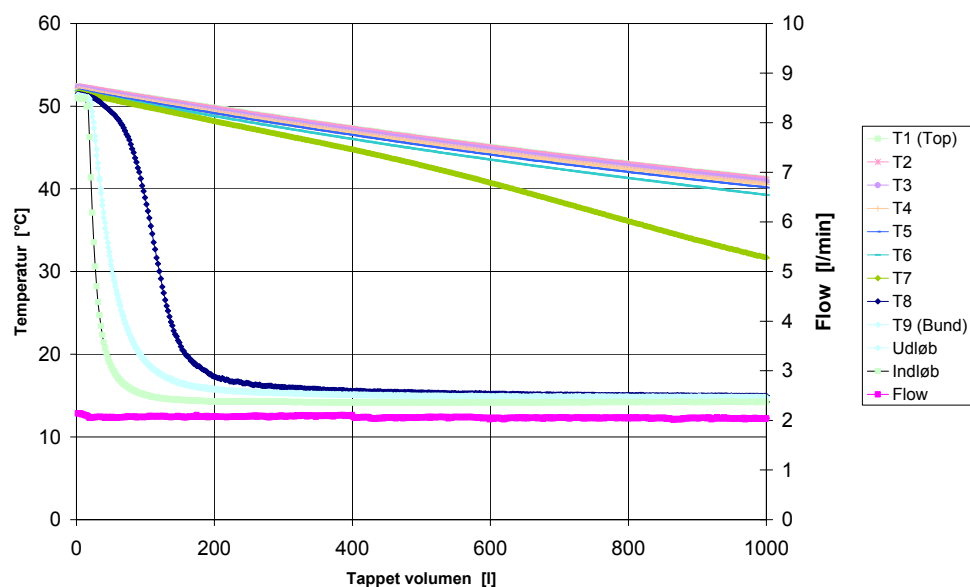
Endelig viser Figur 43 at for en volumenstrøm på 10 l/min påvirkes lagerets temperaturlagdeling op til føler T6, hvilket svarer til mindst 65 cm fra beholderens bund.

I forsøgene med volumenstrømme fra 6 l/min og opefter ses i øvrigt, at de ellers afkølede lagertemperaturer undertiden stiger mærkbart for derefter at falde igen (se f.eks. T8 i Figur 39). Det skyldes, at en højere liggende klap åbnes hvorved varmere væske strømmer nedad i beholderen.

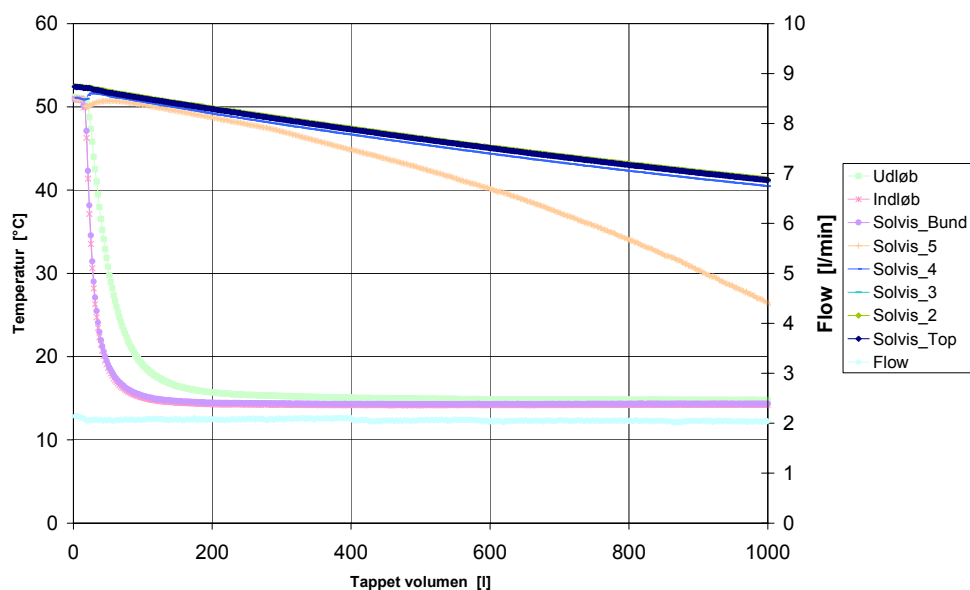
I takt med ovenstående ses det, hvorledes indløbsstrømningen kommer højere og højere op i stratifikationsrøret når volumenstrømmen øges, jf. Figur 36, Figur 38, Figur 40, Figur 42 og Figur 44.

For alle forsøgene falder de øvre temperaturer i beholderen jævnt, men dette skyldes primært varmetabet til omgivelserne og ikke forstyrrelser pga. indløbet.

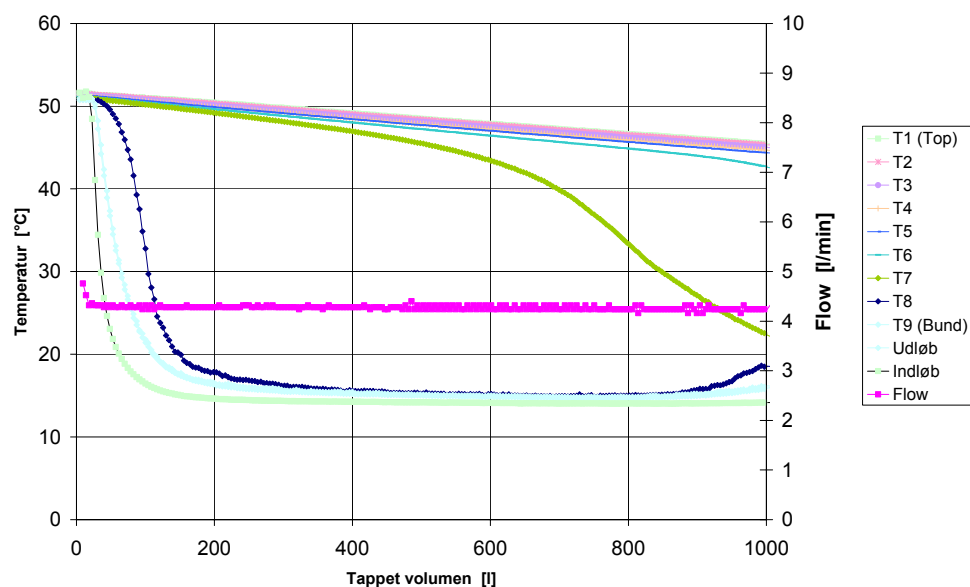
Graden af opblanding vil yderligere blive kvantificeret i afsnit 4.5.



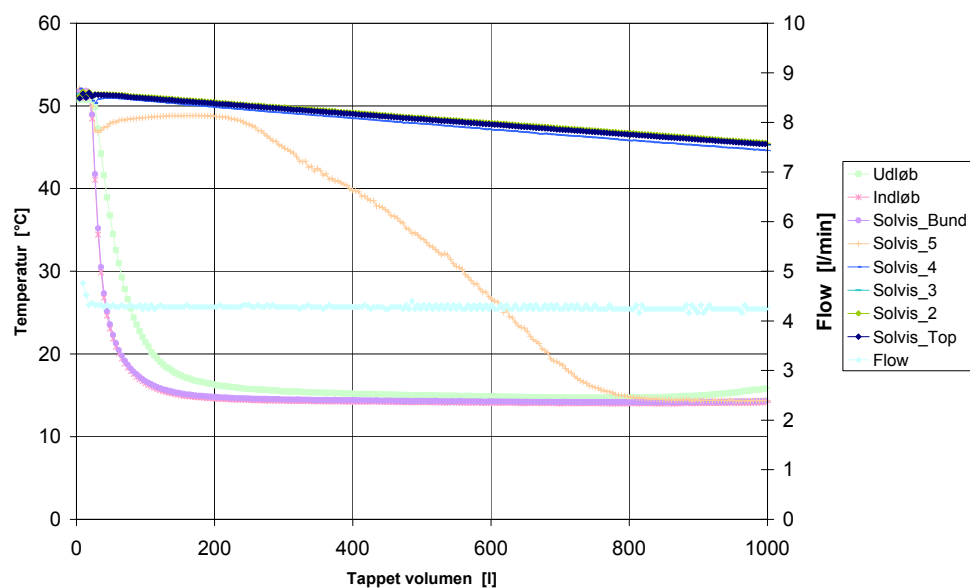
Figur 35: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



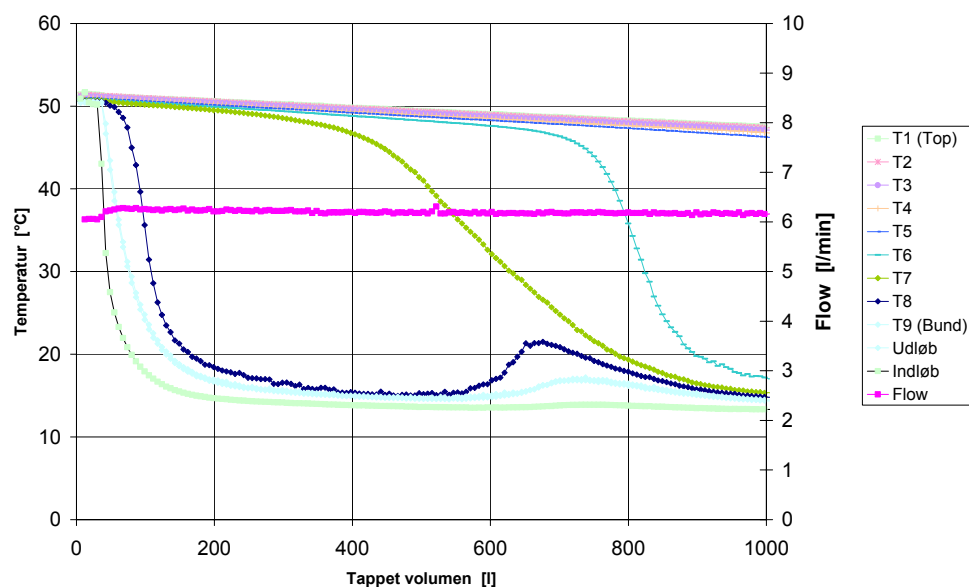
Figur 36: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



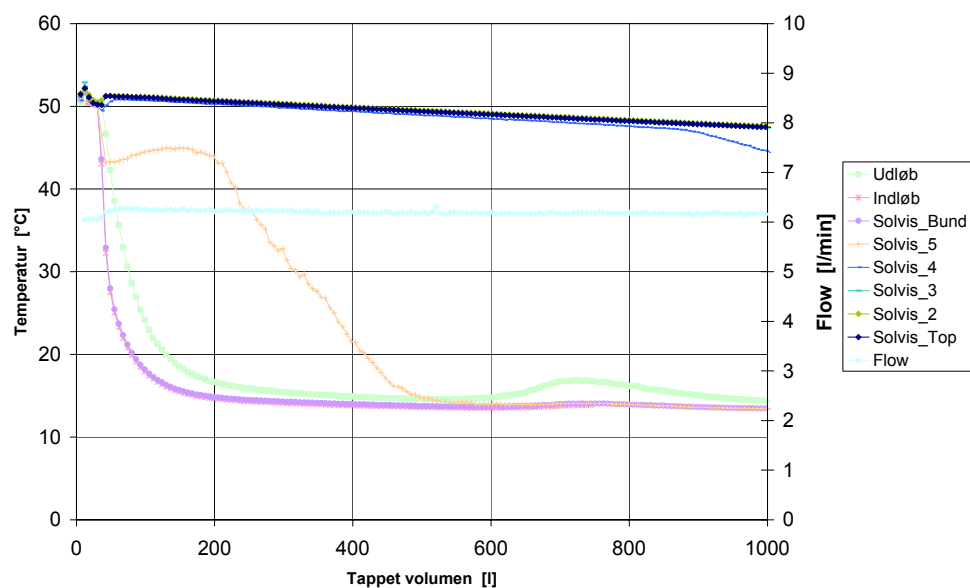
Figur 37: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



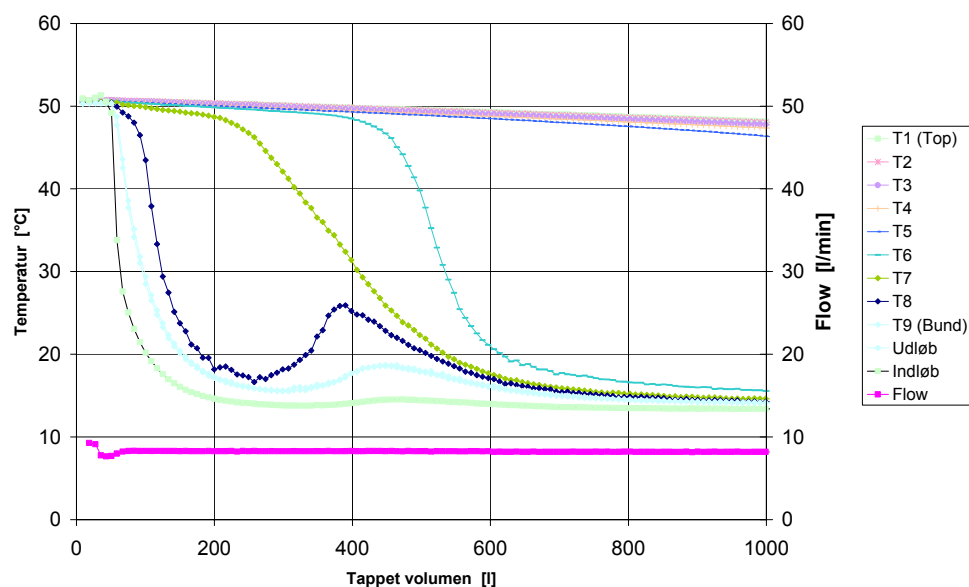
Figur 38: : Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



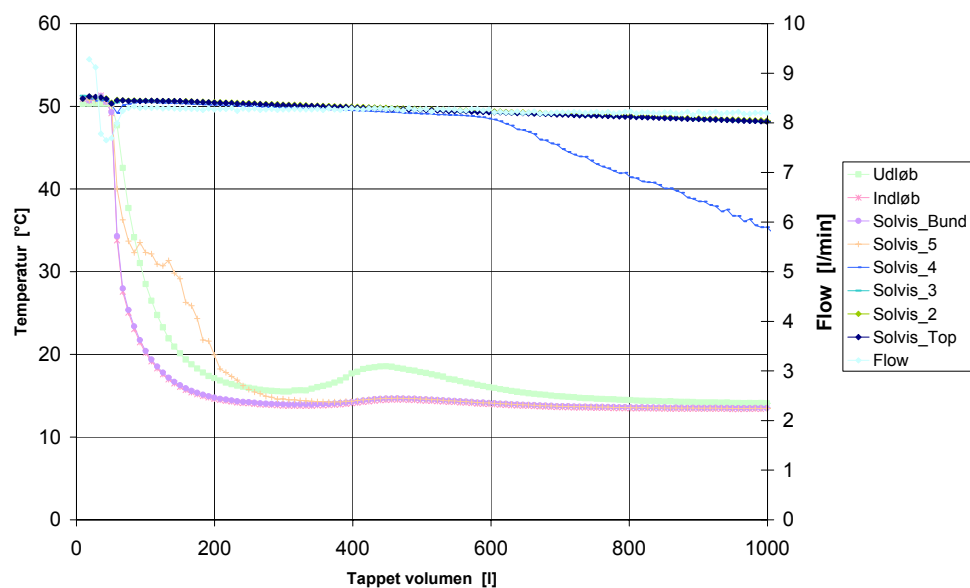
Figur 39 Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 6 l/min.



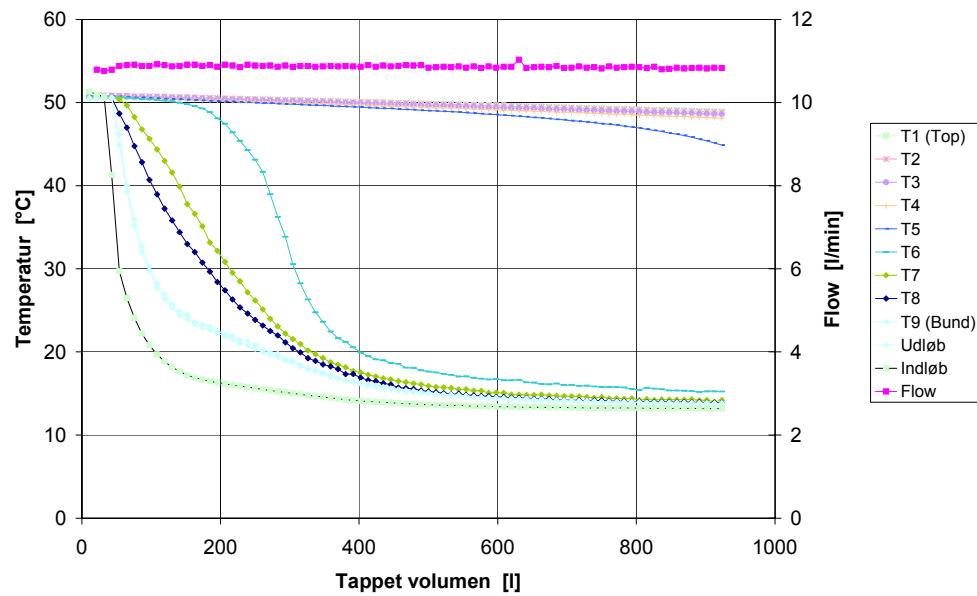
Figur 40: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 6 l/min.



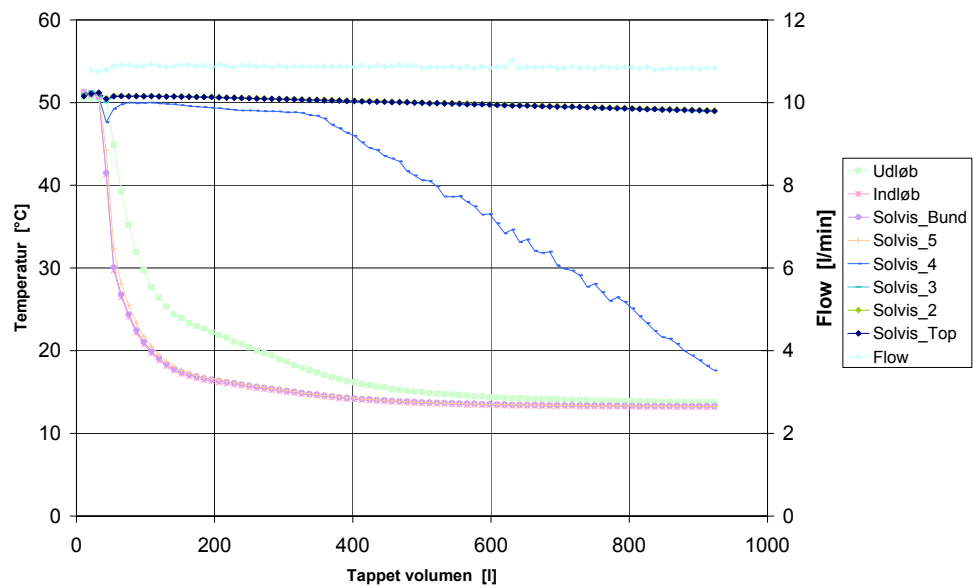
Figur 41: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.



Figur 42: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.



Figur 43: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 10 l/min.



Figur 44: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 10 l/min.

4.4 Afkølingsforsøg med Peter Allen stratifikationsrør

Der er i alt foretaget 5 afkølingsforsøg med volumenstrømmene 1 l/min, 2 l/min, 4 l/min, 6 l/min og 8 l/min. Ved starten af forsøgene er lageret varmt, ca. 50°C. Med en lav fremløbstemperatur på omkring 20°C afkøles lageret via stratifikationsrøret. Forsøget afsluttes efter at 1000 l er strømmet igennem lageret.

Som tidligere nævnt er målet, at afkølingen kun påvirker den del af lageret der er under det nederste udløb i stratifikationsrøret.

Figur 45 - Figur 46 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 1 l/min.

Figur 47 - Figur 48 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.

Figur 49 - Figur 50 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.

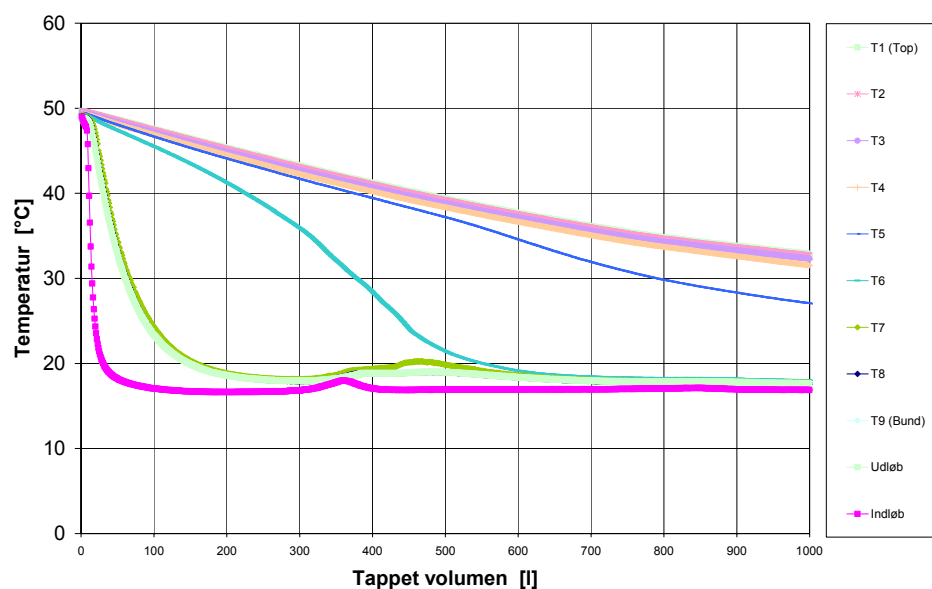
Figur 51 - Figur 52 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 6 l/min.

Figur 53 - Figur 54 viser temperaturudviklingen hhv. i lageret og inde i stratifikationsrøret under afkølingsforsøget med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.

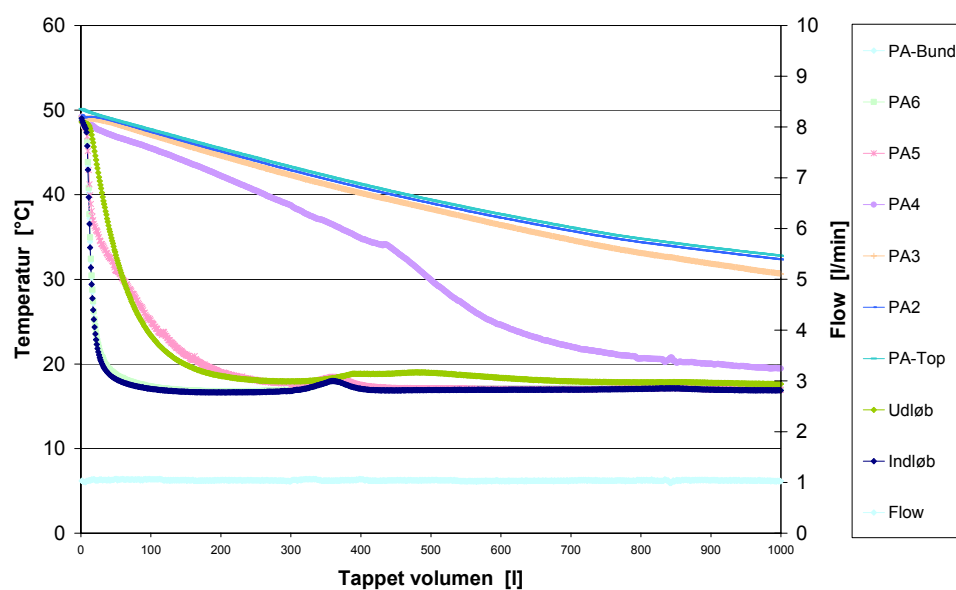
Ved forsøgene er det tydeligt, at opblandingen i lageret er meget afhængig af volumenstrømmen. Således påvirkes lagerets temperaturlagdeling op til føler T5 (51 cm fra bunden) ved det laveste flow, mens næsten hele lageret bliver opblandet ved den høje volumenstrøm på 10 l/min.

I takt med ovenstående ses det, hvorledes indløbsstrømningen kommer højere og højere op i stratifikationsrøret når volumenstrømmen øges, jf. Figur 46, Figur 48, Figur 50, Figur 52 og Figur 54.

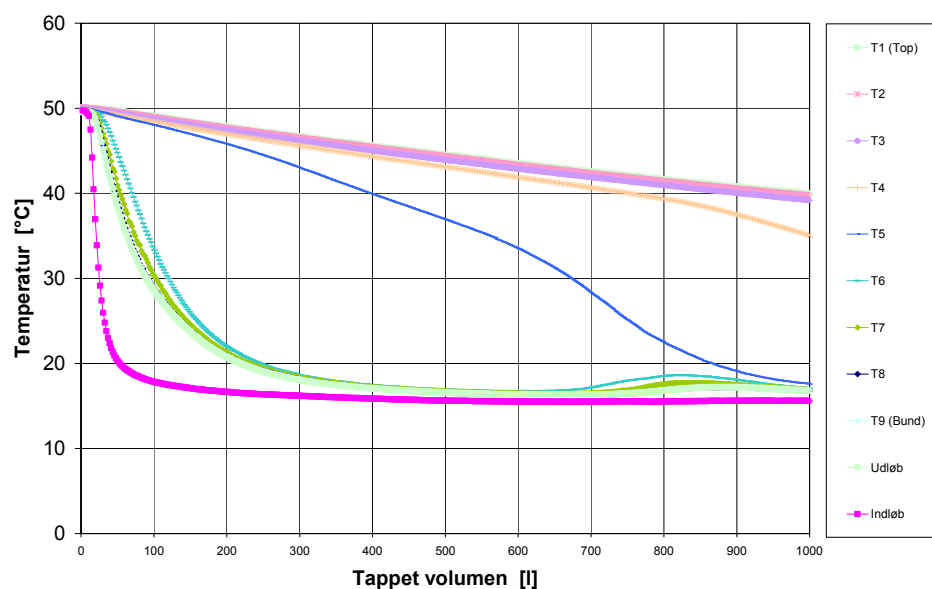
Det er tydeligt, at Peter Allen stratifikationsrøret udviser væsentligt dårligere egenskaber end Solvis stratifikationsrøret under afkølingsforsøget. Forskellene vil yderligere blive belyst i afsnit 4.5.



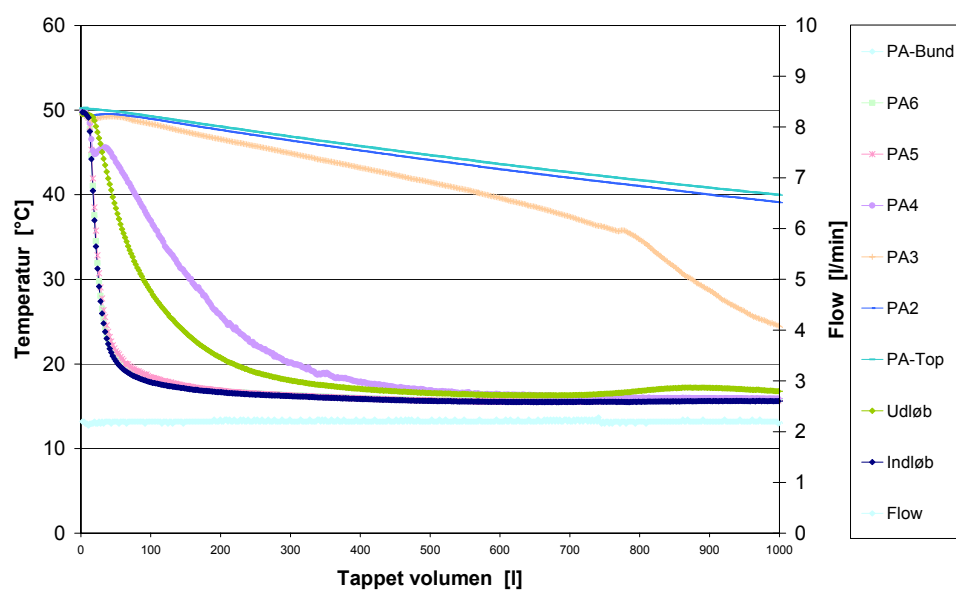
Figur 45: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 1 l/min.



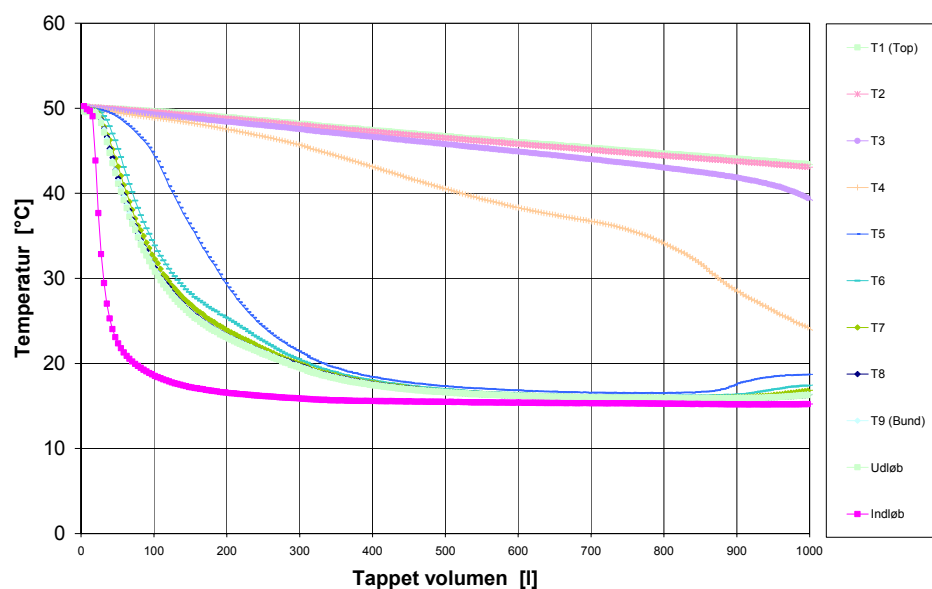
Figur 46: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 1 l/min.



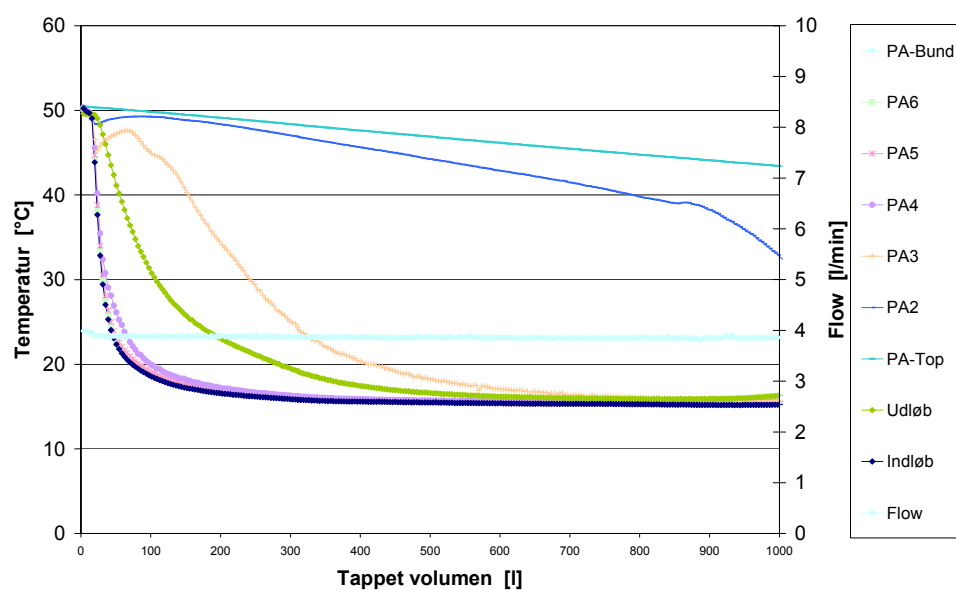
Figur 47: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



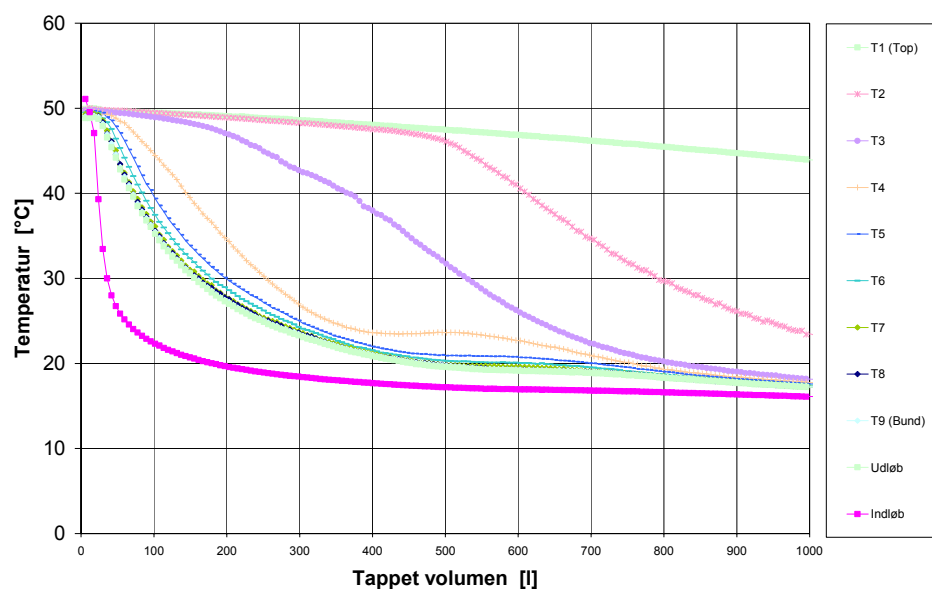
Figur 48: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 2 l/min.



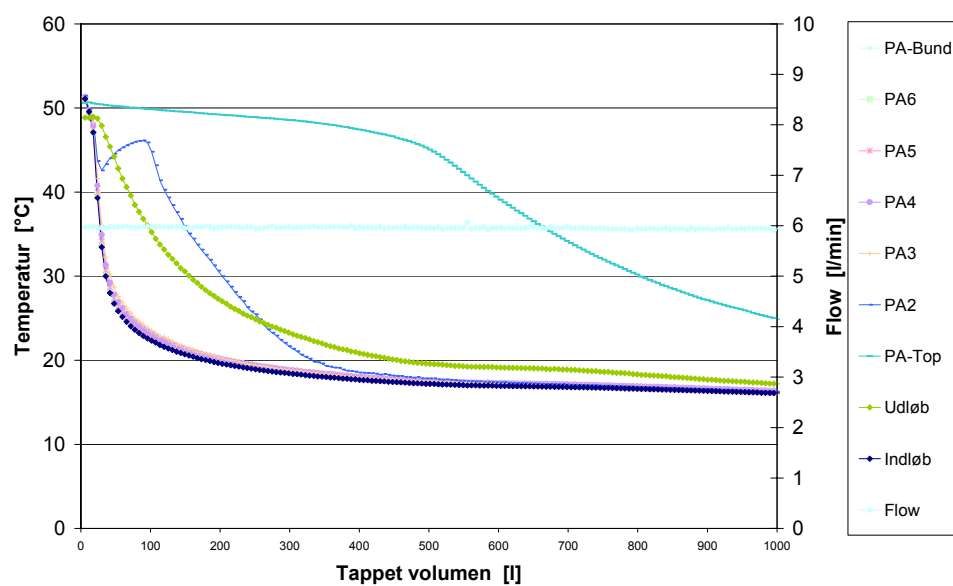
Figur 49: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



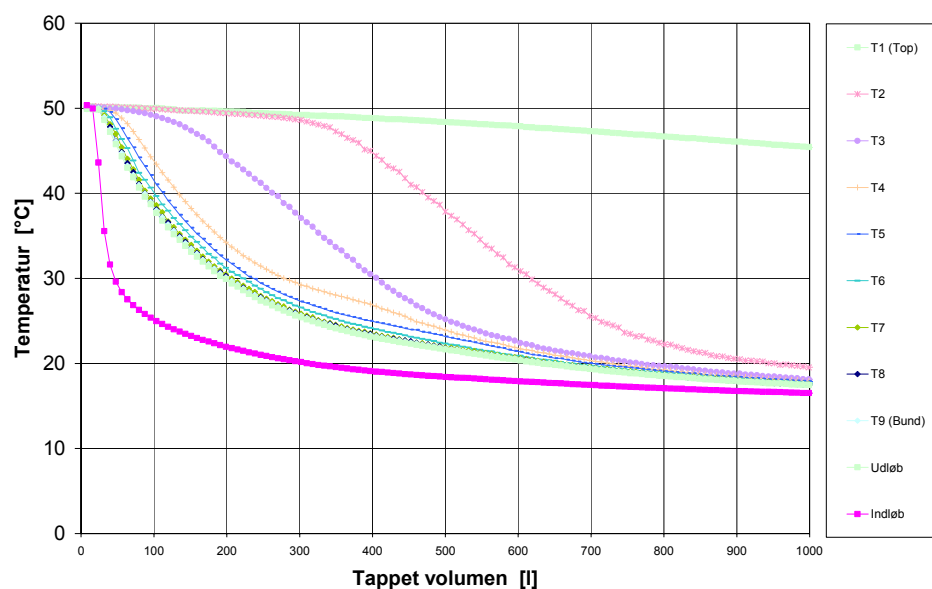
Figur 50: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 4 l/min.



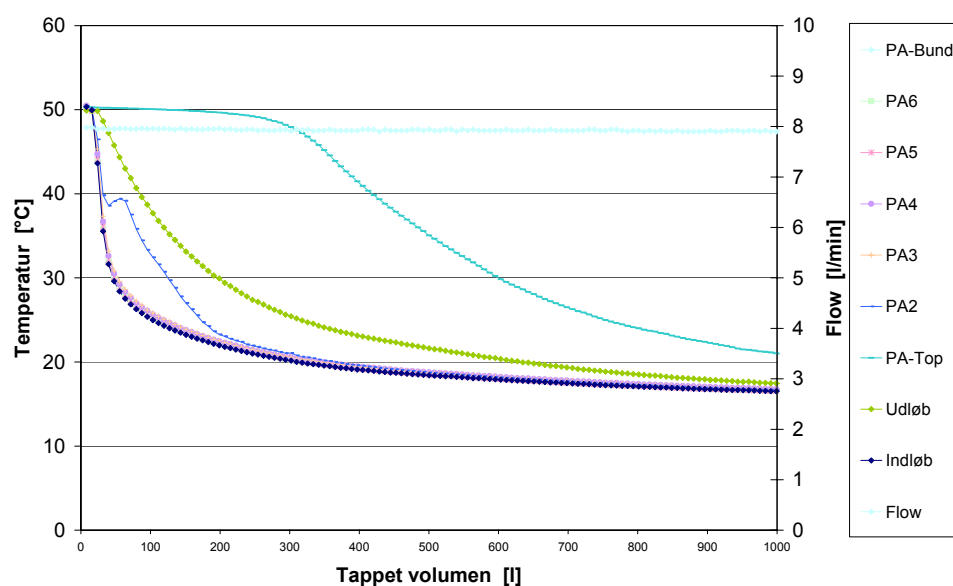
Figur 51: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 6 l/min.



Figur 52: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 6 l/min.



Figur 53: Temperaturer i beholderen under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.



Figur 54: Temperaturer i stratifikationsrøret under afkølingsforsøg med en volumenstrøm på ca. 8 l/min.

4.5 Sammenligning af stratifikationsrørene

I de foregående afsnit er forsøgsresultaterne evalueret kvalitativt, ved at vurdere temperaturkurvernes forløb. I det nedenstående forsøges at give en mere kvantitativ vurdering ved hjælp af analyser af energiindholdet i beholderen.

4.5.1 Opvarmningsforsøg

Ved hjælp af målingerne bestemmes energimængden tilført fra forsøgets start indtil der er tilført et vandvolumen svarende til beholderens anvendte volumen, Q_1 . Det anvendte volumen er som tidligere beskrevet 170 l for Solvis stratifikationsrør og 133 l for Peter Allen stratifikationsrør.

Derudover bestemmes den maksimalt mulige tilførte energimængde under forsøget, forudsat at der ingen omrøring finder sted, Q_2 .

Q_1 og Q_2 beskrives ved:

$$Q_1 = \sum_{t_{start}}^{t_{stop}} V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{inlet} - T_{outlet}) \cdot \Delta t \quad [J]$$

$$Q_2 = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{middel, inlet} - T_{initial}) \quad [J]$$

hvor,

Q_1	er den aktuelle tilførte energimængde	[J]
Q_2	er den maksimalt mulige tilførte energimængde	[J]
V	er det anvendte lagervolumen	[m ³]
$\dot{V}$	er volumenstrømmen	[m ³ /s]
t	er tiden	[s]
T_{inlet}	er indløbstemperaturen	[°C]
T_{outlet}	er udløbstemperaturen	[°C]
$T_{middel, inlet}$	er middel indløbstemperaturen under forsøget	[°C]
c_p	er vandets varmekapacitet	[J/kg·K]
ρ	er vandets densitet	[kg/m ³]

Stratifikationsrørenes effektivitet defineres som forholdet Q_1/Q_2 . Hvis Q_1/Q_2 er lig med 1 betyder det således at stratifikationsrøret virker ideelt. Der skal til det følgende bemærkes, at ved beregning af effektiviteten er der korrigeret for beholdernes varmetab for at tage højde for at forsøgsperioderne ikke er lige lange.

Stratifikationsrørenes effektivitet er i Figur 55 aftegnet som funktion af volumenstrømmen i det aktuelle forsøg. Det fremgår heraf, at Solvis røret har et optimum for volumenstrømme i intervallet 5-8 l/min. Dette er i fin overensstemmelse med observationerne i afsnit 4.1, hvor det fremgik at den højeste temperatur i lageret typisk lå 2-4 K under indløbstemperaturen og hvor forskellen var størst for den mindste volumenstrøm og for den største volumenstrøm.

Forklaringen er som følger:

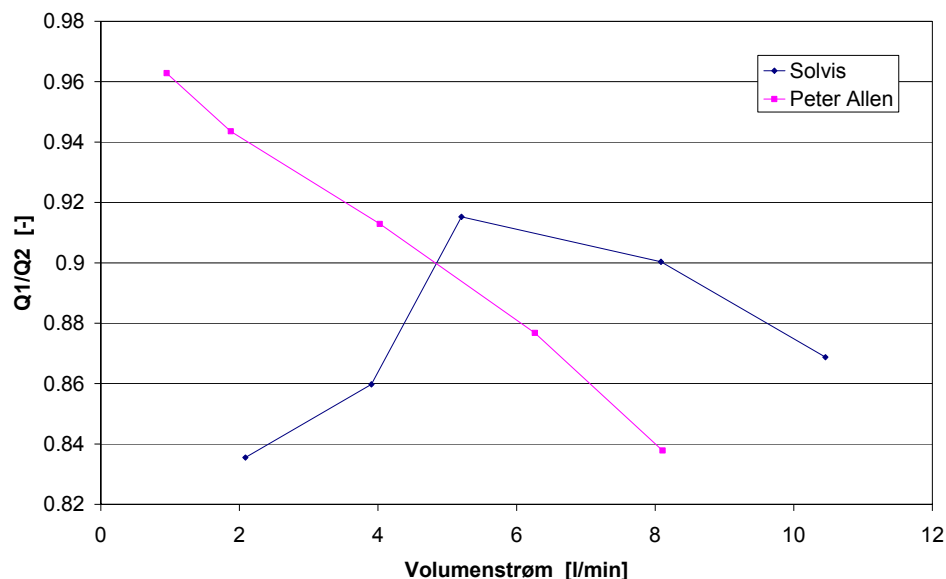
For små volumenstrømme søger den indstrømmende varme væske fint op i toppen af lageret, men de nederste udløbsklapper lukker ikke helt tæt fordi hastigheden i hovedrøret er forholdsvis lav. Derfor bliver der suget væske fra lageret ind i stratifikationsrøret hvilket er med til at reducere den høje fremløbstemperatur. Dermed reduceres stratifikationsrørets effektivitet.

For de lidt højere volumenstrømme øges hastigheden i hovedrøret naturligvis. Det betyder at klapperne i de nederste udløb suges på plads og lukker helt så der ikke kommer væske fra lageret ind i hovedrøret, hvorfor effektiviteten øges.

Med de højeste volumenstrømme strømmer væsken ikke mere hen til det rigtige udløb. Volumenstrømmen er nu blevet så stor så væsken strømmer ud af mere end ét udløb. Derfor reduceres effektiviteten igen.

Peter Allen stratifikationsrørets effektivitet har et andet forløb i Figur 55. Her er effektiviteten klart højest for de små volumenstrømme og lavest for de store volumenstrømme. Og forklaringen er at for de store volumenstrømme strømmer væsken ud af mere end ét udløb, hvorved effektiviteten reduceres.

Af figuren fremgår det i øvrigt, at Peter Allen stratifikationsrøret er at foretrække for volumenstrømme mindre end 4 l/min, hvorimod Solvis stratifikationsrøret fungerer bedre for volumenstrømme over 4 l/min.



Figur 55: Stratifikationsrørenes effektivitet under opvarmningsforsøget.

4.5.2 Afkølingsforsøg

Resultaterne fra afkølingsforsøgene analyseres på samme måde som for opvarmningsforsøgene, idet der dog ikke er tale om egentlige effektiviteter.

Ved hjælp af målingerne bestemmes løbende den tappede energimængde fra forsøgets start indtil der er tappet 1000 l, Q_{tappet} .

Derudover bestemmes den maksimalt tilladelige tappede energimængde under forsøget, forudsat at der ingen omrøring finder sted, Q_{bund} .

Q_{tappet} og Q_{bund} beskrives ved:

$$Q_{\text{tappet}} = \sum_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{stop}}} V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{inlet}} - T_{\text{outlet}}) \cdot \Delta t \quad [J]$$

$$Q_{\text{bund}} = V_{\text{bund}} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{middel, inlet}} - T_{\text{initial}}) \quad [J]$$

hvor,

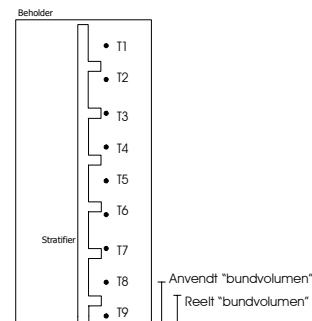
Q_{tappet}	er den aktuelle tappede energimængde	[J]
Q_{bund}	er den maksimalt tilladelige tappede energimængde	[J]
V_{bund}	er lagervolumenet op til temperaturføleren T8 (jf. Tabel 1)	[m ³]
V	er volumenstrømmen	[m ³ /s]
t	er tiden	[s]
T_{inlet}	er indløbstemperaturen	[°C]
T_{outlet}	er udløbstemperaturen	[°C]
$T_{\text{middel, inlet}}$	er middel indløbstemperaturen under forsøget	[°C]
c_p	er vandets varmekapacitet	[J/kg·K]
ρ	er vandets densitet	[kg/m ³]

Q_{bund} bør i princippet være lig med volumen af tanken op til nederste udløb, men det er ikke muligt at bestemme den energimængde, da der ikke er en temperaturføler netop i den højde. Derfor defineres Q_{bund} som energiindholdet i beholderen op til føleren T8, jf. Figur 56.

Stratifikationsrørenes egnethed under afkølingsforsøgene analyseres ved at dividere Q_{bund} op i Q_{TAPPET} . Hvis $Q_{\text{tappet}}/Q_{\text{bund}}$ aldrig overstiger 1 betyder det således at stratifikationsrøret virker ideelt. Jo større $Q_{\text{tappet}}/Q_{\text{bund}}$ er des større er omrøringen. Der skal til det følgende bemærkes, at ved beregning af $Q_{\text{tappet}}/Q_{\text{bund}}$ er der korrigeret for beholdernes varmetab for at tage højde for at forsøgsperioderne ikke er lige lange.

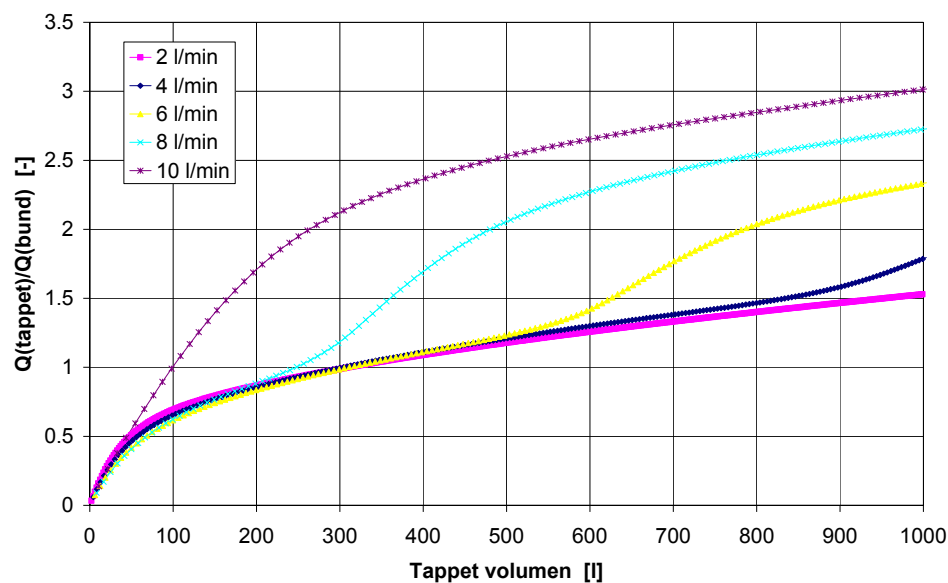
$Q_{\text{tappet}}/Q_{\text{bund}}$ er vist som funktion af det tappede volumen for hhv. Solvis røret og Peter Allen røret i Figur 57 og Figur 58. Her ses det bl.a. at omrøringen, som forventet, er størst for de største volumenstrømme. Desuden ses, specielt for Solvisrøret, at kuverne vokser i "spring". Hvert "spring" indikerer at en klap i et udløb åbnes. Endelig fremgår det også af de to figurer, at omrøringen er meget større for Peter Allen røret end for Solvis røret.

I Figur 59 er $Q_{\text{tappet}}/Q_{\text{bund}}$ efter 1000 liters tapning optegnet som funktion af volumenstrømmen, og her ses det også at omrøringen er meget større for Peter

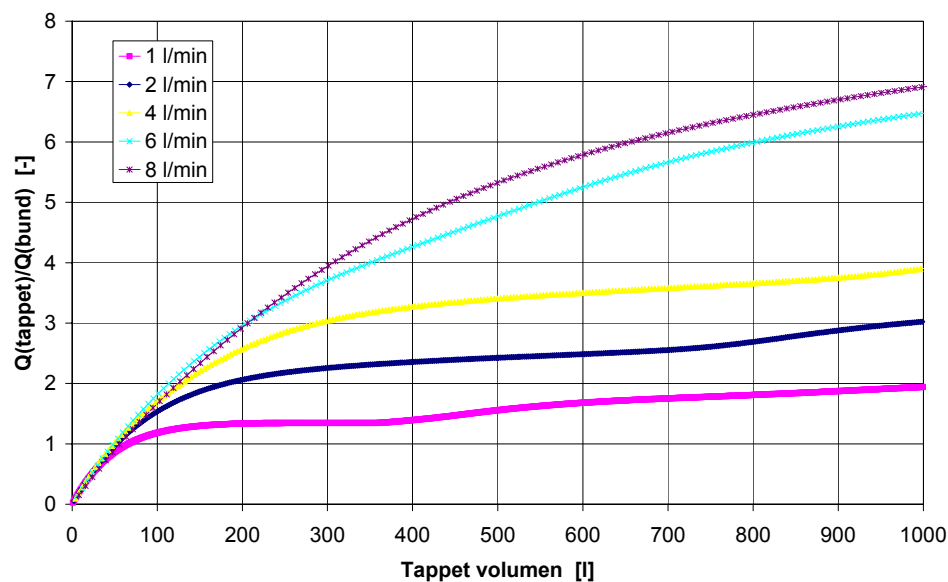


Figur 56: Anvendt bundvolumen ved analysen.

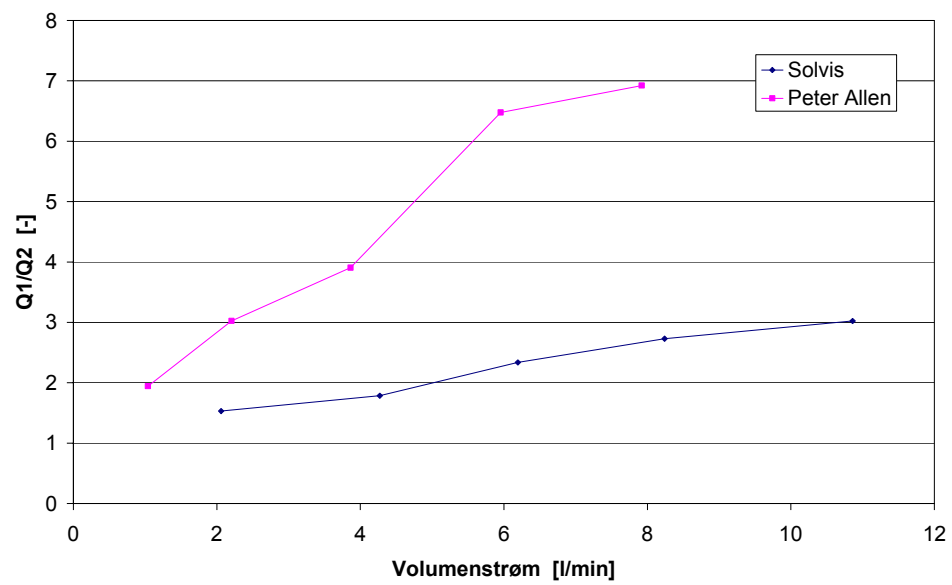
Allen røret end for Solvis røret. Dog tyder resultaterne på at forskellen bliver marginal for de helt små volumenstrømme.



Figur 57: Vurdering af Solvis stratifikationsrøret under afkølingsforsøget.



Figur 58: Vurdering af Peter Allen stratifikationsrøret under afkølingsforsøget.



Figur 59: Sammenligning af stratifikationsrørene under afkølingsforsøgene.

5 Konklusion

Der er i projektet undersøgt to stratifikationsrør. Det ene design er et markedsført tysk design, som er udviklet af det tyske firma SOLVIS-Solarsysteme GmbH. Det andet design er udviklet af Professor Peter Allen, Dalhousie University, Canada, i forbindelse med dette projekt.

Solvis stratifikationsrøret er sammensat af et antal polypropylenrør som hvert er forsynet med en udløbsmulighed. Rørene kan sammensættes så der er en udløbsmulighed for vandet for hver 30. cm i hele rørets udstrækning. Rørenes indre og ydre diameter er hhv. 53 og 60 mm.

Peter Allen stratifikationsrøret består af et gennemgående indløbsrør, som er forsynet med 6 udløbsåbninger. I hver åbning er der monteret en slags kontraventil. Kontraventilen består af en tynd kegleformet plasticskive, som hviler i et konisk sæde. Stratifikationsrøret er udformet således, at der er en udløbsmulighed for vandet for hver 18. cm i hele rørets udstrækning. Rørenes indre og ydre diameter er hhv. 36 og 40 mm.

For begge stratifikationsrør er der udført to forsøgsserier bestående af opvarmningsforsøg og afkølingsforsøg.

For begge rør er der foretaget 5 opvarmningsforsøg med volumenstrømme i intervallet 1 l/min – 10 l/min. Ved starten af forsøgene er lageret koldt, ca. 20°C. Med en rimelig konstant fremløbstemperatur på ca. 35°C opvarmes lageret via stratifikationsrøret. Her er målet at en bedst mulig temperaturstratificering opbygges under forsøget.

Tilsvarende er der foretaget 5 afkølingsforsøg med volumenstrømme i intervallet 1 l/min – 10 l/min. Ved starten af forsøgene er lageret varmt, ca. 50°C. Med en lav fremløbstemperatur på omkring 20°C afkøles lageret via stratifikationsrøret. Forsøget afsluttes efter at 1000 l er strømmet igennem lageret. Her er målet at temperaturniveauet i beholderen ødelægges mindst muligt – dvs. at kun et mindst muligt volumen bør afkøles af den indstrømmende væske.

For opvarmningsforsøgene viste resultaterne at Peter Allen stratifikationsrøret er at foretrække for volumenstrømme mindre end 4 l/min, hvorimod Solvis stratifikationsrøret fungerer bedre for volumenstrømme over 4 l/min.

For afkølingsforsøgene viste resultaterne at omrøringen er meget større for Peter Allen røret end for Solvis røret. Dog er tyder resultaterne på at forskellen bliver marginal for de helt små volumenstrømme.

På baggrund af forsøgene kan man overordnet konkludere, at Peter Allen stratifikationsrøret er velegnet til volumenstrømme mindre end 2 l/min, hvorimod Solvis stratifikationsrøret især er velegnet til volumenstrømme i intervallet 5-8 l/min.

Det kan endvidere konkluderes, at de to stratifikationsrør ikke fungerer helt perfekt – selv ikke ved de volumenstrømme hvor de virker bedst. Der er således behov for et fortsat udviklingsarbejde inden for dette område.