



OSLO METROPOLITAN UNIVERSITY  
STORBYUNIVERSITETET

Department of Civil Engineering and Energy Technology  
Institutt for Bygg- og energiteknikk

Energi og miljø i bygg

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

OPPGAVE/KANDIDAT NR.

42

TILGJENGELIGHET

Åpen

Telefon 67 23 50 00

[www.oslomet.no](http://www.oslomet.no)

# MASTEROPPGAVE

MASTEROPPGAVENS TITTEL	DATO
Optimalisering av trykkfall i et bergvarmeanlegg	15.08.2022
	ANTALL SIDER/ANTALL VEDLEGG
	55/8
FORFATTER	VEILEDER
Klara Ringstad Lundgård	Rebecca Allen

UTFØRT I SAMARBEID MED	KONTAKTPERSON
Nordisk Energikontroll	Kjell Øvrebø

SAMMENDRAG
Oppgaven omhandler optimalisering av bergvarmeanlegget ved Oslo Kristne Senter i Lillestrøm kommune. Brønnparken består av 18 kollektorer ved varierende dybde og diameter. Problemstillingen var å finne de optimale volumstrømmene i kollektorene som ga lavest mulig trykkfall, for på denne måten redusere driftkostnadene til sirkulasjonspumpen. Oppgaven har blitt utført i Matlab med ekstrapakken 'Optimization Toolbox'. Det ble formulert tre optimalingsscenarioer som ga en trykkfallsreduksjon på henholdsvis 4.75%, 8.3% og 23.3%. For pumpedrift tilsvarer det en reduksjon på 3.2%, 5.5% og 17%

3 STIKKORD
Optimalisering
Bergvarmeanlegg
Pumpedrift

# Forord

Denne masteroppgaven er skrevet av Klara Ringstad Lundgård ved masterstudiet Energi og miljø i bygg- sivilingeniør ved OsloMet- Storbyuniversitet våren 2022. Oppgaven er utarbeidet i samarbeid med Nordisk Energikontroll, og er den avsluttende hovedoppgaven. Oppgaven utgjør 30 av totalt 120 studiepoeng av det toårige masterprogrammet.

Jeg vil utrope en stor takk til ekstern veileder Kjell Øvrebø for sitt engasjement i oppgaven, hans faglige tyngde og hans villighet til å dele den.

En spesiell takk går til min interne veileder Rebecca Allen for sitt engasjement, tålmodighet og hennes vilje til å bistå i veiledning av oppgaven. Hennes pedagogiske evner og forståelse for faget strømningsmeknikk og MatLab har vært enestående. Våre ukentlige møter har vært avgjørende for gjennomføringen og forståelsen av denne masteroppgaven. Tusen takk!

En takk må også tildeles Morten Eddie Jacobsen, daglig leder for Fabian AS for gode faglige innspill og veiledning. Salgsavdelingen ved Wilo har også vært svært hjelpelige med relevant informasjon om sirkulasjonspumpen.

Opplevelsen av å gjennomføre denne oppgaven har vært utfordrende, spennende og lærerikt. Jeg har fått muligheten til å fordype meg i prinsippene bak grunnvarme - et tema det har vært relativt lite fokus på i mine fem år ved OsloMet, men et tema jeg opplever som veldig interessant. Oppgavens utforming har gitt meg innblikk i både strømningsmeknikk, grunnvarme, varmpumper, varmetransport og regulering, og kompleksiteten ved det hele.

Resultatene i oppgaven kan ansees som et lite bidrag til energibesparelse, et stadig aktuelt og viktig tema for fremtiden. Oppgaven har også belyst mulige vinklinger til videreutvikling av allerede eksisterende anlegg, slik at de kan bli mer energieffektive. Ved å optimalisere driftsprosessen kan energiforbruket reduseres og økonomiske gevinster oppnås.

Jeg vil også rette en takk til mine medstudenter for gode faglige innspill, humor og et godt samhold som har gjort månedene med oppgaveskriving litt lettere. En ekstra takk går også til mine foreldre og min samboer for støtte gjennom våren 2022.

OsloMet, Institutt som bygg- og energiteknikk, 15.08.2022

---

Klara Ringstad Lundgård

---

## Sammendrag

Denne masteroppgaven omhandler et bergvarmesystem med 18 energibrønner installert ved Oslo Kristne Senter (OKS) i Lillestrøm kommune. Den gjennomgående tematikken for oppgaven er *optimalisering*. Problemstillingen er utformet som en undersøkelse av mulighetene til å redusere driftskostnader i et bergvarmeanlegg. Dette ble spesifisert til å omhandle sammenhengen mellom volumstrømmene i kollektorslangene i borehullene og sirkulasjonspumpen som sirkulerer arbeidsmediet i nevnte kollektorer. Formålet er å undersøke mulighetene for energieffektivisering og kostnadsreduksjon ved å finne optimale volumstrømmer i kollektorene som gir lavest mulig trykkfall. Dette uten at det påvirker uttaket av varmeenergien fra brønnparken.

Opgaven ble utformet i Matlab. Det ble utformet to Matlab- script - et med en deterministisk tilnærming og ett for optimalisering. Det deterministiske scriptet representerer dagens drift, hvor inputparameterne samstemmer med utformingen av bergvarmeanlegget ved OKS og verdiene til de 18 volumstrømmene er hentet fra innreguleringsprotokollen. Resultatene har fungert som en bilde på dagens trykkfall og som et referansegrunnlag til optimaliseringen. Optimaliserings-scriptet baserer seg på det deterministiske Matlab- scriptet og er utformet etter fremgangsmåte beskrevet i brukermanualen 'Optimization Toolbox'.

Det ble etablert tre optimaliseringsscenarioer. Scenarioene studerer hvordan trykktapet varierer med forskjellige tillatte øvre og nedre grenser for arbeidsområdet til volumstrømmene. Scriptet ble kodet til å løse for optimaliserte volumstrømmer som gir lavest trykktap, samt tilhørende Reynoldstall, rattinnstillinger og Kv- verdier. Driftsscenarioet som ble undersøkt gjelder for maksimal kapasitet i fyringssesongen hvor gjennomstrømningen i sirkulasjonspumpen er på maksimum.

Det ble også foretatt et parameterstudie for hvordan trykkfallet i anlegget endret seg ved forskjellige arbeidsmedier; Vann, HX24 og HX35. HX24 og HX35 ble undersøkt ved temperaturene -3 til 4°C og vann for temperaturene 1- 4°C. Innvirkningen av ruhet i rørene ble også studert.

Fra det deterministiske scriptet ble totalt trykkfall funnet til å være 250.9 kPa, hvor trykkfallet i brønnparken utgjorde 180.9 kPa og trykkfall over fordampere i varmpumpen er 70 kPa. De tre optimaliseringsscenarioene ga en reduksjon i trykkfall på henholdsvis 4.75 %, 8.3 % og 23.3 %. For pumpedrift tilsvarte det en reduksjon på 3.2 %, 5.5 % og 17 %.

Trykkfallsberegning som fremkom i den deterministiske tilnærmingen indikerte at sirkulasjonspumpen ved OKS er underdimensjonert. Kun ett av optimaliseringsscenarioene ga et trykktap lavt nok til å kunne implementeres ved OKS uten å måtte foreta justeringer på dagens installerte sirkulasjonspumpe. Dette gjelder scenarioet hvor trykkfallet er redusert med 23.3%

Matlab- scriptene er utformet spesifikt etter rørstrukturen ved OKS, men kan videreutvikles slik at de kan benyttes for andre bergvarmeanlegg. Oppgaven kan ansees som et bidrag til energioppfølging og -effektivisering, og hvordan det er mulig å utnytte tilgjengelige energikilder på best mulig måte.

---

## Abstract

This master's thesis examines a ground source heat system of 18 energy wells installed at Oslo Kristine Senter (OKS) located in Lillestrøm municipality. The overall theme of the thesis is *optimization*. The problem statement is designed as an investigation into the possibilities of reducing operating costs in a geothermal heating system. This was specified by studying the connection between the volume flows in the collectors in the boreholes and the circulation pump that circulates the working medium in said collectors. The purpose is to investigate the possibilities for energy efficiency and cost reduction by finding optimal volume flows in the collectors that give the lowest possible pressure drop. This without affecting the extraction of thermal energy from the well park.

The task was designed in Matlab. Two Matlab scripts were developed - one with a deterministic approach and one for optimization. The deterministic script represents today's operation, where the input parameters agree with the design of the ground source heating system at OKS, and the values of the 18 volume flows are taken from the adjustment protocol. The results have served as a picture of today's pressure drop and as a reference basis for the optimization. The optimization script is based on the deterministic Matlab script and is developed according to procedures described in the user manual 'Optimization Toolbox'.

Three optimization scenarios were established. The scenarios study how the pressure loss varies with different permitted upper and lower limits for the working range of the volume flows. The script was coded to solve for optimized volume flows that give the least pressure loss, as well as the associated Reynolds numbers, the valves' opening degree and Kv- value. The operating scenario investigated applies to maximal capacity during the heating season where the flow through the circulation pump is set to its maximum.

A parameter study was also undertaken for how the pressure drop in the plant was changed by the different working fluids; Water, HX24 and HX35. HX24 and HX35 were investigated at the temperatures -3 to 4 °C and water for temperatures 1- 4°C. The impact of the pipes roughness was also studied.

From the deterministic script, the total pressure drop was found to be 250.9 kPa, where the pressure drop in the energy wells was 180.9 kPa and the pressure drop across the evaporator in the heat pump was 70 kPa. The three optimization scenarios produced a reduction of pressure drop of 4.75 %, 8.3 % and 23.3 % respectively. For pump operation, this corresponded to a reduction of 3.2 %, 5.5 % and 17 %.

The pressure drop found in the deterministic approach indicated that the circulation pump at OKS is undersized. Only one of the optimization scenarios gave a pressure drop low enough to be implemented at OKS without requiring any adjustments to the existing circulation pump. This is the scenario where the pressure drop is reduced by 23.3 %

The Matlab scripts are designed specifically according to the pipe structure at OKS but can be further modified for use in other ground source heating systems. This master thesis can be regarded as a proposal on how to carry out energy monitoring and efficiency improvements, and how to utilize available energy sources in the best possible way.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn og oppgavens relevans . . . . .	1
1.2	Formål . . . . .	2
1.3	Problemstilling . . . . .	2
1.4	Struktur . . . . .	2
1.5	Litteraturstudie . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>5</b>
2.1	Bergvarme . . . . .	5
2.1.1	Prinsipp . . . . .	6
2.1.2	Varmeoverføring i en energibrønn . . . . .	8
2.2	Hva er optimalisering . . . . .	9
2.3	Relevante ligninger . . . . .	9
2.4	Brønnparken ved OKS . . . . .	10
2.4.1	Sirkulasjonspumpe . . . . .	13
2.4.2	Regulering . . . . .	13
2.4.3	Strømningsteknikk . . . . .	14
2.4.4	Energi . . . . .	15
2.4.5	Samlekum . . . . .	15
2.4.6	Arbeidsmedium . . . . .	16
2.4.7	Varmepumperør . . . . .	16
2.4.8	Reguleringsventiler . . . . .	16
2.4.9	Frikjøling og tørrkjøler . . . . .	17
2.5	Trykkfall . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>19</b>
3.1	Valg av metode . . . . .	19
3.2	Oppbygning og nummerering . . . . .	19
3.3	Forutsetninger og begrensninger . . . . .	21
3.4	Matlab . . . . .	21
3.4.1	Navngiving i Matlab . . . . .	22
3.4.2	Funksjoner i Matlab . . . . .	23
3.5	Arbeidsprosessen . . . . .	23
3.5.1	Flytdiagram for deterministisk Matlab- script . . . . .	24
3.5.2	Gjennomgang av deterministisk Matlab- script . . . . .	25
3.5.3	Arbeidsprosessen i optimaliseringsscript . . . . .	26
3.5.4	Flytdiagram for optimaliseringsscriptet . . . . .	27
3.6	Trykkfallsberegninger . . . . .	29
3.6.1	Trykktap over reguleringsventiler . . . . .	29
3.6.2	Støttap . . . . .	30
3.7	Parameterstudie . . . . .	31
3.8	Videre undersøkelser . . . . .	33

<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>34</b>
4.1	Deterministisk problem . . . . .	34
4.2	Optimalisering . . . . .	36
4.2.1	Trykktap . . . . .	36
4.2.2	Trykktapsreduksjon . . . . .	38
4.2.2.1	Alternativt driftsscenario . . . . .	39
4.2.3	Volumstrømmer . . . . .	40
4.2.4	Reynoldstall . . . . .	42
4.2.5	Rattinnstilling og tilhørende Kv- verdier . . . . .	43
4.3	Energibesparelser og pumpekarakteristikk . . . . .	45
4.4	Parameterstudie . . . . .	47
4.4.1	Temperatur . . . . .	47
4.4.2	Ruhet . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Diskusjon og konklusjon</b>	<b>49</b>
5.1	Oppgavens bidrag . . . . .	49
5.2	Diskusjon . . . . .	50
5.2.1	Vurdering av volumstrømmer og trykktapsendringer . . . . .	50
5.2.2	Parameterstudie . . . . .	52
5.2.3	Usikkerhet knyttet til resultatene . . . . .	52
5.3	Validering av metode . . . . .	53
5.4	Begrensninger . . . . .	53
5.5	Konklusjon . . . . .	54
5.6	Videre arbeid . . . . .	55
	<b>Vedlegg</b>	<b>58</b>
<b>A</b>	<b>Systemskjema OKS</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Brønnplassering OKS</b>	<b>60</b>
<b>C</b>	<b>Matlab- script: Deterministisk problem</b>	<b>61</b>
<b>D</b>	<b>Matlab- script: Optimalisering</b>	<b>66</b>
<b>E</b>	<b>Input parameterstudie</b>	<b>71</b>
<b>F</b>	<b>Matlab- script: Parameterstudie</b>	<b>72</b>
<b>G</b>	<b>Pumpekarakteristikk</b>	<b>76</b>
<b>H</b>	<b>Tilleggsinformasjon om OKS</b>	<b>81</b>

# Figurer

2.1	Tverrsnitt av en energibrønn - hentet fra Prenøk [24]	6
2.2	Væske/vann- varmepumpe med grunnvarme som varmemedium	7
2.3	Varmeoverføringsprinsipp mellom kollektor, rørvegg og fjell	8
2.4	Plassering av energibrønner	11
2.5	Systemskjema over brønnparken ved OKS	12
2.6	Wilo-Stratos GIGA 80/1-32/4,1.- hentet fra Wilo [35]	13
2.7	Forgrening for samleikum A	14
2.8	Eksempel på utforming av samleikum - hentet fra MuoviTech.no [18]	15
2.9	Oversiktsbilde av frikjølingskrets og tørrkjøler ved OKS	17
2.10	Oversikt over bend og forgreninger i anlegget ved OKS	18
3.1	Navngiving av rørstrekk	20
3.2	Flytdiagram av arbeidsprosessen for deterministisk script	24
3.3	'For'- løkke for trykktap for alle 41 rørstrekk	26
3.4	'For'-løkke for trykktap grunnet reguleringsventilene for de 18 kollektorene	26
3.5	Flytdiagram over arbeidsprosessen for optimaliseringsscriptet	27
3.6	Øvre og nedre grense i fiminimax- funksjonen	28
3.7	Sammenhengen mellom trykktap og ventiler i MatLab- script	29
3.8	'For'- løkke med interpolasjon som gir rattinnstillinger	30
3.9	'For'- løkke som gir Kv- verdier	30
3.10	Oversikt over OKS med nummerering av strekker og støttap	30
3.11	'For'- løkke for parameterstudie av ruhet og temperatur	32
4.1	Fordeling av trykktap for deterministisk problem	35
4.2	Pumpekarakteristikk for GIGA WILO 80/1- 37/5,3 sirkulasjonspumpe med deterministisk undersøkelse	35
4.3	Trykkfallsfordeling for de tre optimaliseringsscenarioene	37
4.4	Sammenligning av trykktap for den deterministiske modellen og de tre optimaliseringsscenarioene	38
4.5	Trykkfallsfordeling til forkastet scenario	39
4.6	Optimale volumstrømmer for scenario 1	40
4.7	Optimale volumstrømmer for scenario 2	41
4.8	Optimale volumstrømmer for scenario 3	41
4.9	Reynoldstall for alle 41 strekk	42
4.10	Rattinnstillinger for de tre optimaliseringsscenarioene	43
4.11	Pumpekarakteristikk for optimaliseringsscenarioene	46
4.12	Resultater av parameterstudie for temperatur av arbeidsmediene HX24, HX35 og vann	47
4.13	Resultater for parameterstudie av ruhet for rørene	48
A.1	Systemskjema OKS	59
B.1	Oversiktsbilde av brønnplassering ved OKS	60

---

C.1	Matlab- script for deterministisk problemstilling . . . . .	65
D.1	Matlab- script for optimalisering . . . . .	70
F.1	Matlab- script: Funksjonen til parameterstudie . . . . .	75
F.2	Matlab- script for parameterstudie: a) Ruhet og b) Temperatur . . . . .	75
G.1	Pumpekaraktertistikk for Wilo Stratos GIGA 80/1-37/5,3 for deterministisk scenario	77
G.2	Pumpekaraktertistikk for Wilo Stratos GIGA 80/1-37/5,3 for optimaliseringsscenario 1 . . . . .	78
G.3	Pumpekaraktertistikk for Wilo Stratos GIGA 80/1-37/5,3 for optimaliseringsscenario 2 . . . . .	79
G.4	Pumpekaraktertistikk for Wilo Stratos GIGA 80/1-37/4,1 for optimaliseringsscenario 3 . . . . .	80

# Tabeller

1.1	Litteraturstudie . . . . .	3
2.1	Oversikt over samleikum, navn, dybde, diameter og volumstrøm ved OKS . . . . .	11
2.2	Reguleringsventil STAD 25 med tilhørende rattinnstillinger og $K_v$ - verdier . . . . .	16
2.3	Trykktapskoeffisienter . . . . .	18
3.1	Navngiving i Matlab . . . . .	22
3.2	Oversikt over strekk og tilhørende støttap . . . . .	31
4.1	Optimale volumstrømmer . . . . .	40
4.2	$K_v$ - verdier til optimaliseringsscenarioene . . . . .	44
4.3	Effekt- og energibehov til sirkulasjonspumpen . . . . .	45
4.4	Påvirkning av temperatur for arbeidsmediene HX24, HX35 og vann . . . . .	47
4.5	Trykkfall ved forskjellige ruhet på rørene for HX24, HX35 og vann . . . . .	48
E.1	Inputverdier for vann som arbeidsmedie . . . . .	71
E.2	Inputverdier for HX24 som arbeidsmedie . . . . .	71
E.3	Inputverdier for HX35 som arbeidsmedie . . . . .	71
H.1	Oversikt over dybde fra bakkenivå til fjell . . . . .	81

# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn og oppgavens relevans

Fokuset på energieffektivisering og å ta miljøbevisste valg øker stadig i takt med klimautfordringen verden står ovenfor. Da strømprisene økte på Østlandet vinteren 2021/2022 ble det brått en ny hverdag for mange, og i kombinasjon med et stadig økende energibehov ga det bedrifter og privatpersoner et nytt insentiv til å energieffektivisere eksisterende systemer.

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) skriver om at potensialet for energieffektivisering i bygninger i Norge er stort. En av de mest lønnsomme tiltakene er energioppfølging [22]. Studien utført gjennom denne masteravhandlingen kan betraktes som et bidrag mot dette målet, samt belyse kunnskap om optimalisering og kostnadseffektiv drift. Gjennom optimalisering av varmeanlegg kan man redusere utgifter for både leietagerne og byggeierne ved å bidra til bedre energieffektivitet og lengre levetid.

I nabolandet Sverige har bergvarmeanlegg lenge vært et veletablert alternativ til vannbåren oppvarming. Det er utbredt på grunn av sin lange levetid og moderate krav til vedlikehold. Forfatterne Andersson, S., Puttige, A. R., Östin, R. og Olofsson, T. skriver i artikkelen fra 2021 (publisert 2022) at 20 -25% av eneboliger benytter seg av bergvarmesystemer i Sverige. [26]

Norge følger etter trenden. Utnyttelsen av bergvarme gjennom energibrønner er i løpet av de i siste årene også blitt et etablert alternativ i Norge. Sandberg, T. skriver i en artikkel i Dagsavisen fra desember 2021 at det antas at antall energibrønner skal nå 50000 i løpet av året 2022 [8]. Til tross for relativt store investeringskostnader, er det ansett som en lønnsom investering, spesielt i perioder med høye elektrisitetskostnader. Det er mulighet for økonomisk støtte fra Enova til etableringen av slike anlegg. I tillegg bidrar bergvarme til å avlaste strømmettet, er utslippsfri i drift og benytter en naturlig lavtemperatur energikilde. Med flere aktører på markedet, mer forskning og utvikling på fagfeltet er det tydelig at flere og flere ser mulighetene ved bergvarme som energikilde.

Opgaven er utformet av Nordisk Energikontroll i samarbeid med OsloMet- Storbyuniversitet. Entreprenørfirmaet Nordisk Energikontroll fremmet et ønske om å undersøke mulighetene for å energieffektivisere bergvarmeanlegget ved Oslo Kristne senter (OKS). Hensikten er å optimalisere volumstrømmene i energibrønnene og på den måten redusere kostander knyttet til pumpedrift.

## 1.2 Formål

Formålet med masteroppgaven er å undersøke og finne ideelle volumstrømmer i kollektorslangene og oppnå laveste mulig trykkfall i anlegget. Ved en optimalisert løsning vil energibruken til sirkulasjonspumpen reduseres, uten at det påvirker varmeutvinningen fra grunnvarmeanlegget.

Oppgaven er ment å belyse muligheten for energibesparelser som gir arbeidet relevans for fremtiden, og vise at bygnings- og energisektoren alltid må etterstrebe å utnytte ressursene som er tilgjengelig på best og mest effektivt måte.

For å gi oppgaven mer substans ble videre ideen om å utføre en parameterstudie utformet gjennom drøfting og diskusjon med intern- og ekstern veileder. Parameterstudien undersøker hvordan trykkfallet ved OKS potensielt ville blitt påvirket ved ulike arbeidsmedier ved forskjellige temperatur og rørenes ruhet.

## 1.3 Problemstilling

Ved installasjon og igangsetting av anlegget ved OKS ble det ikke undersøkt hva som er optimale volumstrømmer i den lukkede og parallellkoblede brønnparken. Gjennom oppgaven fikk studenten muligheten til å utfordre det som er dagens normer for bestemmelse av volumstrømmer, og fremvise en metode som muliggjør besparelser.

Bergvarmeanlegget ved OKS består av 18 energibrønner med varierende dybde fra 180- 310 meter, og er dimensjonert for å dekke byggets varmebehov. Scenarioet som har blitt undersøkt og forsøkt optimalisert er for maksimal drift hvor alle energibrønnene er i bruk og sirkulasjonspumpa driftes for maksimal væskemengde på 12,56 l/s.

Oppgavens problemstilling er å se på muligheten til å optimalisere trykkfallet i anlegget ved å undersøke og justere dagens volumstrømmer, uten at det påvirker for mengden energi som hentes ut fra brønnparken. På den måten kan man redusere strømforbruket som kreves for å drive sirkulasjonspumpen og begrense belastningen på pumpen.

Oppgaven er gjennomført ved bruk av programmet Matlab. Matlab gjør det mulig å beskrive anleggets utforming og oppbygning ved hjelp av matriser samt utføre trykkfallsberegninger i ett og samme script. Det gir også en riktig matematisk- og strømningsteknisk tilnærming til hvordan anlegget er strukturert og hvordan trykkfallet manifesterer seg i anlegget. Matlab har tilleggspakker som har optimalisering som formål.

## 1.4 Struktur

Oppgaven er strukturert slik at relevant teori, prinsipper, tilhørende matematiske ligninger og uttrykk blir presentert og forklart i kapittel 2: Teori. I det samme kapitlet gis informasjon av det aktuelle bergvarmeanlegget ved Oslo Kristne Senter (OKS).

En gjennomgang av metode og fremgangsmåte er beskrevet med tilhørende flytdiagram av arbeidsprosessen. Matlab- scriptene er i sin helhet vedlagt (vedlegg C, D og F), og de fire undersøkte scenarioene er beskrevet. Relevant informasjon om parameterstudiet vil også bli presentert.

Resultatene som omhandler trykkfall, Reynoldstall, optimale volumstrømmer, parameterstudiet, pumpekaraktistikk og besparelser for sirkulasjonspumpen for det deterministiske problemet og de tre optimaliseringsscenarioene er fremstilt i kapittel 4: Resultat.

Oppgaven avsluttes med en diskusjon over oppgavens styrker og svakheter, dens vitenskapelige bidrag og forfatterens konklusjoner. Det presenteres også en liste over forslag til mulig videreføringsarbeid og tematikken optimalisering.

## 1.5 Litteraturstudie

Formålet med utført litteraturstudie er å undersøke utbredelsen av tematikken rundt optimalisering av eksisterende bergvarmeanlegg. En litteraturstudie er også nødvendig for å understreke at oppgaven er unik i den forstand at studentens problemstilling ikke har eller i liten grad har blitt undersøkt tidligere. Ved å utføre litteratursøk før oppstart av en oppgave eller forskningsprosjekt unngår man en overflod av faglitteratur med samme innhold. Et litteratursøk gir også informasjon som kan være relevant for gjennomføringen av masteroppgaven.

‘Heating Pumps Technologies’ publiserte i 2022 et digitalt bibliotek ved navn ‘Annex 52’. Her er det samlet oppdaterte og fagfelleverderte forskningsartikler, case studier, og masteroppgaver som omhandler grunnvarme. Blant bidragslandene finner en Storbritannia, USA, Norge, Nederland, Tyskland, Finland og Sverige. Annex 52 har som mål å danne et datagrunnlag med kvalitetsmålinger gjort av grunnvarmeanlegg for kommersielle, institusjonelle og privateide bygg, samt bygge en kunnskapsbro mellom forskjellige fagfelt. Annex 52 danner derfor et datagrunnlag som kan anvendes som et referansesett til videre studier eller utvikling av nye og eksisterende bergvarmeanlegg [2]. Annex 52 har derfor blitt benyttet som et referansebibliotek kombinert med litteratursøk fra akademiske databaser. Mye av litteraturen fra Annex 52 er dog tilstandsrapporter for opererende anlegg og har derfor blitt definert som ikke relevant for denne oppgaven og vil ikke bli presentert.

I tabell 1.1 er en samlet oversikt over fagartiklene som har blitt undersøkt i litteraturstudiet fremstilt. I tillegg til fagtekster har det blitt søkt på internett, i kompetansebiblioteket [19] og fagbøkene [36] [7] [6] [27] for relevant informasjon.

Forfatter	År	Ref.	Trykk	#Borehull	Dybde [m]	Metode	Kjøling
Ebnes, K., Hagen, E.	2017	[10]	-	100	250	Dataanalyse	✓
Torgesen, J.	2019	[29]	-	10	225	IDA ICE	-
Mantovan, M., Benassi, G. Azzolin, Del Col. D.	2013	[9]	-	4	80	EED	✓
Nordgård-Hansen, E., Kishor, N., Midttømme, K., mm.	2022	[20]	-	5	100	Pygfunction, Python	-
Puttige, A. R., Andersson, S., Östin, R., Olofsson, T.	2022	[26]	-	125	250	ANN	✓
Bockelmann, F. Fisch, M. N.	2019	[5]	-	70	100- 150	Case studie Dataanalyse	✓
Prestegaard, U.	2014	[23]	✓	24	200	EED, SIMIEN Matlab	-
Acuña, J.	2010	[3]	✓	-	250	FEM software DTRT	-
Lundgård, K.	2022	-	✓	18	180- 310	Matlab	-

Tabell 1.1: Litteraturstudie

Etter utført litteratursøk ser man at optimalisering er en tematikk som er gjennomgående, men da med søkelys på å optimalisere faktorer som samspillet mellom varmepumpesystemet og energibrønnene [5] [9], lading ved solfangere [20] [23] eller fjernvarmeanlegget [26]. Litteraturen som benytter ordet ‘optimalisering’ eller ‘optimalt design’ i tittelen var tekstene [9] [20] [26] [5]. De fleste av artiklene har/hadde som mål å utføre en ytelsesanalyse eller undersøke systemenes tilstand og etablere hva som fungerer og ikke. Trykkfall som tematikk var ikke utbredt. Litteratur som omhandler kostnadsbesparelser [20] [26] [29] [10], mens kun [26] fremlegger informasjon om reduksjon av CO<sub>2</sub>- utslipp som kunne oppnås.

En andel litteratur inkluderer analyser av bergvarme i kombinasjon med frikjøling [10] [29] [9] [26] [5] OKS benytter seg også dette, men det er ikke inkludert i denne oppgaven.

Torgesen, J. [29] har analysert effekten av ulike faktorer for optimalisering av en energibrønn. Forfatteren har sett på parametere som kollektorenes dybde, radius, antall brønner og grunnens egenskaper. Dette er alle faktorer som er relevante for etableringen av nye anlegg, men som er



kostnadskrevene og kan være teknisk utfordrende å iverksette for allerede eksisterende anlegg. Teksten nevner volumstrømmens relevans.

All litteraturen fra tabell 1.1 omhandler eksisterende anlegg. 'Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers' av Acuña [3] er en del av en doktoravhandling og utforsker dermed et bredere spekter av parametere, men har også utført undersøkelsene for flere eksisterende anlegg. Acuña er den eneste som har fokus på å undersøke trykkfall knyttet til forskjellige volumstrømmer.

Ingen faglitteratur som har blitt undersøkt har anlegg med varierende volumstrømmer og dybder 1.1 tilsvarende brønnene ved OKS. Kun [23] har benyttet programvaren Matlab til deler av sin masteroppgave.

# Kapittel 2

## Teori

### 2.1 Bergvarme

Grunnvarme er en felles betegnelse på utnyttelse av lavtemperatur termisk energi i grunnen; i fjell, grunnvann, løsmasser og jord [33]. Utnyttelsen av bergvarme er en teknologi som ligger i et skjæringspunkt av fagfeltene varmepumpeteknologi, geologi, energiutvinning, varmetransport og strømningsteknikk. Grunnet sin kompleksitet er det mange faktorer å vurdere ved undersøkelser av grunnvarmeanlegg. I dette kapitlet vil relevant teori om bergvarme, strømningsteknikk, varmeoverføring og informasjon om anlegget ved OKS blir presentert.

Bergvarme er en miljøvennlig og utslippsfri energikilde. Bergvarme utnytter den geotermiske energien som er lagret i form av varme under jordens faste overflate. Varmen kommer hovedsakelig av solvarme lagret i grunnen, men ved dype brønner (300+ meter) er den termiske energi dannet ved spaltning av radioaktive mineraler [31].

Grunnvarme kommer med en stor investeringskostnad knyttet til selve boringen av brønnene, men ellers har grunnvarme mange fordeler:

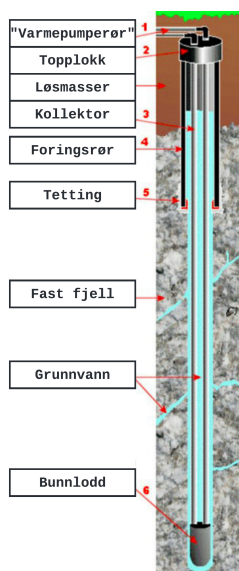
- Forutsigbare driftskostnader
- Krever lite vedlikehold
- Høy driftssikkerhet
- Temperaturstabil kilde som gir gode driftsbetingelser for varmepumpa
- Kan benyttes til både oppvarming og kjøling
- Kan brukes til sesonglagring av energi
- Fornybar og utslippsfri
- Påvirkes lite av utetemperaturen
- Lang levetid

Det finnes to systemer for energibrønner; lukket eller åpent system. For et åpent system monteres det pumper som skal pumpe opp grunnvann og gjennom infiltrasjonsbrønner blir grunnvannet infiltrert tilbake mot grunnen etter utveksling av energi mot varmepumpen. Et åpent system krever derfor tilstrekkelig mengde grunnvann. For et lukket system installeres det plastkollektorer hvor det sirkulerer et arbeidsmediet. Disse kollektorene fungerer som varmevekslere mot omkringliggende grunnvann og fjell [24]. I Norge er lukkede systemer mest utbredt og OKS er et slik system. Anlegget bygges nær bygningsmassen og antas å ha en levetid på over 50 år [24].

Energimengden det er mulig å hente ut fra en energibrønn avhenger av boreddybde, geografiske lokasjon og grunnens geologiske egenskaper. Berggrunnens varmeledningsevne varierer fra 2 til 4,5 W/mK, men øker ved høyt innhold av kvarts [34]. En termisk responstest benyttes til å finne berggrunnens varmeledningsevne og termiske egenskaper. Ved nevnte test blir det også utført målinger av grunnvannsnivå og temperaturgradienten i brønnen. Ved større anlegg (>2000 brønnmeter) anbefales dette for å oppnå riktig dimensjonering [24].

Bergvarme er en lavtemperaturkilde. Temperaturen i grunnen i de øverste 200-300 meterne varierer fra lokasjon til lokasjon, men en tommelfingerregel er at temperaturen øker med 1-3 grader per 100 meter. Ved en dybde på cirka 20 meter har grunnen tilnærmet konstant temperatur året gjennom [23]. En vanlig antagelse er at temperaturen i grunnen ligger 1–2 °C høyere enn stedets årsmiddeltemperatur [31], men man må være oppmerksom på at lokale variasjoner kan forekomme og det kreves geologiske undersøkelser ved dimensjonering. Grunnens temperatur er en viktig parameter ved dimensjonering, driftsstrategi og valg av varmepumpeanlegg [24].

Grunnvarmebaserte varmepumpesystemer inneholder en varmepumpe, borehull med varmevekslere, varmepumperør og en sirkulasjonspumpe som sirkulerer arbeidsmediet. Figur 2.1 viser oppbygningen av en energibrønn og dens komponenter. Energien hentes fra fast fjell der kun den grunnvannsfylte delen av energibrønnen som kan regnes som effektiv [24]. Foringsrøret med topplokk har som funksjon å stabilisere løsmassene over fjellet og beskytte brønnen. Varmen i løsmassen benyttes ikke i en energibrønn.



Figur 2.1: Tverrsnitt av en energibrønn - hentet fra Prenøk [24]

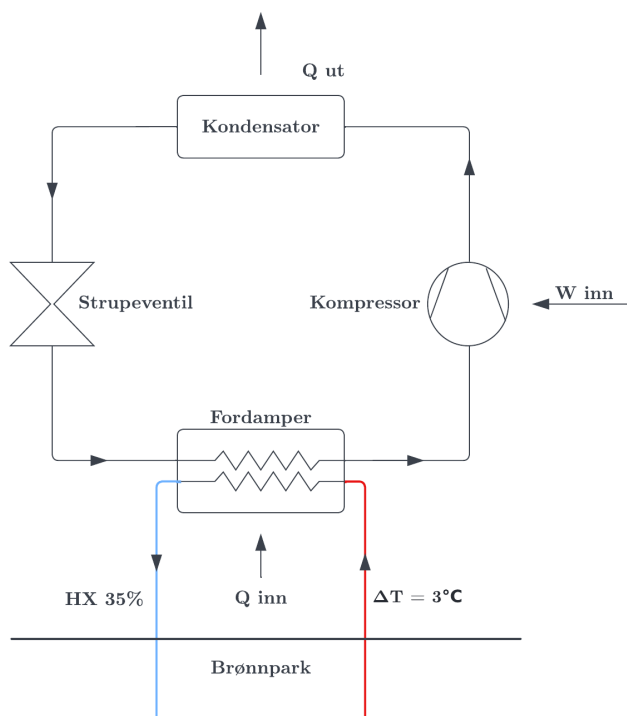
I sommersesongen kan også energibrønnene benyttes til kjøling. Kjøleenergi som har blitt lagret i grunnen i løpet av fyringssesongen blir utnyttet. Man bruker da arbeidsmediet ved lav temperatur til kjøle ventilasjonsluften via en varmeveksler uten at det brukes energi fra en kjølemaskin [33]. Derav navnet frikjøling.

### 2.1.1 Prinsipp

Kollektorslangene fylles med et frostsikkert arbeidsmedium (vann/glykol- miks) som blir pumpet rundt i anlegget ved hjelp av en sirkulasjonspumpe. Væsken 'kjøres' ned i borehullet hvor det er installert en kollektorslange formet som en U- rør, enkelt eller dobbelt. I borehullene skjer det en termisk varmeoverføring fra grunnen til kollektorslangene. Den nå oppvarmede væsken fraktes tilbake til varmesentralen. Ved større anlegg med mange borehull, fordelt på et større areal er

det vanlig å benytte seg av samleklummer som et bidrag til trykkreduksjon. Kollektorslangene til de forskjellige energibrønnene (både tur og retur) samles i en samleklum hvor antall slanger reduseres og rørdimensjon på røret som leder fluidet til og fra varmesentralen øker.

Med hjelp av grunnvarmepumpe økes temperaturen til et tilstrekkelig temperaturnivå på 50- 60 °C som leveres til bygningsmassen [33]. Denne overføringen av varme foregår i fordampere i varmepumpen. Se figur 2.2 for hvordan brønnparken er koblet til varmepumpen. Hvor mye varme som blir avgitt til varmepumpen fra brønnparken finner man fra ligningen 2.1. Varmen kan utnyttes i radiatorer eller i gulvvarme, og til å varme opp ventilasjonsluften via en varmeveksler og til oppvarming av tappevann.



Figur 2.2: Væske/vann- varmepumpe med grunnvarme som varmemedium

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad [J/s]/[W] \quad (2.1)$$

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} \quad [kg/s] \quad (2.2)$$

Hvor  $C_p$  er arbeidsmediets spesifikke varmekapasitet. Mediets spesifikke varmekapasitet forteller om hvor mye varme som må tilsettes 1 kg av et stoff for at temperaturen skal øke med 1 °C.

En varmepumpe består av fire komponenter; Kompressor, kondensator, strupeventil og fordamper. Energi fra brønnparken blir ført gjennom fordampere. Varmeenergien fra brønnparken tas opp av arbeidsmediet og går over i gassform. Gassen blir komprimert i kompressoren ved at det tilføres energi ( $W_{inn}$ ), slik at trykket og temperaturen i gassen øker til et nivå som kan anvendes i bygningsmassen. Gassen ledes videre til kondensatoren hvor varmen blir avgitt til systemet. Varmeoverføringen gjør at gassen kondenserer og går over i væskeform. Deretter strupes væsken over strupeventilen som resulterer i en trykkreduksjon og arbeidsmediet går nok en gang over i gassform, og prosessen kan start igjen.

### 2.1.2 Varmeoverføring i en energibrønn

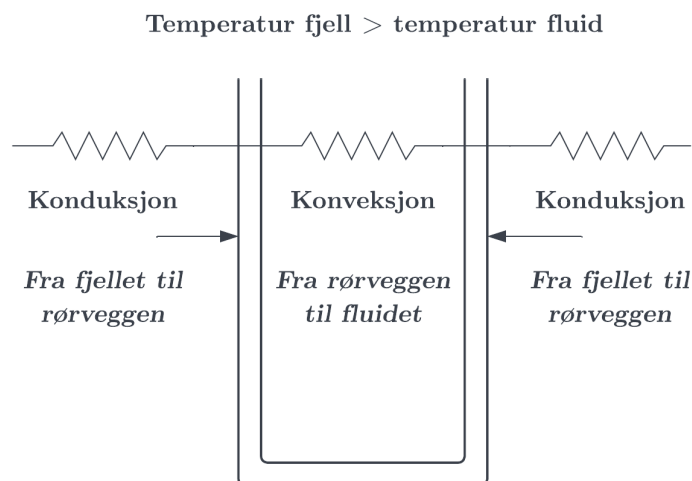
Varme er en energiform som utveksles på grunn av en temperaturforskjell. Termodynamikkens 2.lov sier at overføringen av varme alltid skjer fra varm til kald kilde. Varme kan overføres ved tre forskjellige måter: konduksjon, konveksjon eller stråling. Konduksjon og konveksjon beskrives i nærmere detalj i dette delkapittelet da disse prinsippene er vesentlige for utnyttelsen av energi i et bergvarmesystem.

**Konduksjon** er energioverføringen som inntreffer når energiholdige molekyler kolliderer med mindre energiholdige molekyler [6]. Antall kollisjoner endrer seg frem til temperaturen i materialet har stabilisert seg. I fjell er konduksjon den viktigste/dominerende formen for varmetransport [2]. Grunnens varmeledningsevne ( $k$ ) er et mål på materialets evne til å lede varme og er derfor en viktig faktor ved undersøkelser for potensiell utvinning av grunnvarme.

Konduksjon kan forekomme i faste stoffer, væske og gasser. For væsker og gasser er konduksjon et resultat av kollisjoner og diffusjon av molekyler. For faste stoffer er det en kombinasjon av energitransport ved fri elektroner og molekylenes vibrasjoner. Konduksjonsraten avhenger av faktorer som type materiale, materialets geometri og tykkelse, samt temperaturdifferansen over materialet.

**Konveksjon** er varmeoverføringen mellom et fast stoff og en væske i bevegelse, og involverer kombinasjon av konduksjon og væskebevegelse. Jo raskere strømningshastighet, jo høyere konveksjonsrate. Sirkulasjonspumpen sørger for turbulent strømming i kollektorene, og er satt som en forutsetning for at varmeoverføringen fra grunnen til en grunnvarmekollektor skal fungere. Ved laminær strømming øker den termiske resistansen mellom arbeidsmediet og kollektorlangen. [3]. Det dannes et nærmest stillestående lag med væske langs rørveggene som har en isolerende effekt som resulterer i en lavere varmeoverføring. I kollektorene er det tvungen konveksjon da fluidet strømmer på grunn av en sirkulasjonspumpe, mens det er naturlig konveksjon fra grunnvannbevegelse i omliggende fjellgrunn.

En bergvarme varmeveksler består av tre elementer: fjellgrunnen, røret og det sirkulerende arbeidsmediet. Energimengden det er mulig å hente ut avhenger av samspillet mellom deres termiske motstander. Varmeoverføring til fluidet avhenger av de termiske egenskapene til den omkringliggende grunnen, kollektoren og konveksjonen fra grunnvannbevegelsen [3]. En forutsetning for at varmeoverføring skal skje er at temperaturen på arbeidsmediet må være lavere enn temperaturen i grunnen. Figur 2.3 er en enkel illustrasjon over varmeoverføringen mellom kollektoren og grunnen.



Figur 2.3: Varmeoverføringsprinsipp mellom kollektor, rørvegg og fjell

## 2.2 Hva er optimalisering

Denne masteroppgaven har optimalisering som en gjennomgående problemstilling. Optimalisering er definert som *å gjøre så god som mulig, å bringe en prosess eller et system til et optimum under de betingelsene som er gitt*, i følge Det store norske leksikon (SNL) [13]. SNLs definisjon kan implementeres i masteroppgavens problemstilling. De gitte betingelsene er bergvarmeanleggets utforming, rørenes lengder, diameter og ruhet, arbeidsmediet, sirkulasjonspumpen og den totale volumstrømmen. Trykkfallet i anlegget skal reduseres til en mulig optimal minimumsverdi ved kun å variere volumstrømmene i de 18 kollektorene.

## 2.3 Relevante ligninger

Ligningene 2.4 - 2.11 er noen av ligningene som har blitt benyttet i Matlab-scriptene.

Volumstrøm er definert som volumet av væsken som passerer et tverrsnitt i røret per tidsenhet og kan beregnes ved ligning 2.3

$$\dot{V} = v * A \quad [m^3/s] \quad (2.3)$$

Darcy-Weisbachs ligning (2.4) gir trykkfallet som forekommer på grunn av friksjon langs en gitt lengde av et rør når det fører en væskestrøm. Det er en funksjon av forholdet mellom friksjonsfaktoren, rørlengde- og diameter, væskens hastighet og tetthet. Tetthet er et mål på hvor mye av en fysisk størrelse som finnes innen et gitt volum og har benevnningen  $kg/m^3$ . Tetthet er masse dividert med volum [16].

$$\Delta P = f * \frac{L}{D} * \frac{\rho v^2}{2} \quad [Pa] \quad (2.4)$$

Colebrook ligningen (2.5) benyttes for å finne Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor når strømmingen er definert som turbulent. Friksjonsfaktoren avhenger utforming av røret (sirkulær eller ikke-sirkulær), diameter, friksjon, Reynoldstallet og relativ ruhet.  $\varepsilon$  representerer ruheten til innvendig vegg i rørene og har benevnningen meter. Når ruheten er dividert på rørdiameter, blir det kalt 'relativ ruhet.' Høyere relativ ruhet gir større/høyere friksjon. Colebrook ligningen 2.5 krever en iterativ løsning.  $f$  er et benevningsløst tall.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log * \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad [-] \quad (2.5)$$

Reynoldstallet (Re) et dimensjonsløst tall som forteller om strømmingen er turbulent eller laminær. Ved turbulent strømming strømmer væsken i et irregulært mønster som hele tiden endres [36]. Hvis  $Re > 4000$ , ansees strømming som turbulent. Reynoldstallet regnes ut i fra ligning 2.6.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad [-] \quad (2.6)$$

Hvor  $v$  er gjennomsnittlig strømningsfart i røret,  $\rho$  er fluidets tetthet,  $D$  er rørets diameter og  $\mu$  er den dynamiske viskositeten. Man skiller mellom dynamisk ( $\mu$ )- og kinematisk ( $\nu$ ) viskositet. Begge beskriver "seiheten" til væsken og er et mål på en væskes motstand mot bevegelse [15]. Kinematisk viskositet gir en størrelse som ikke involverer masse, mens dynamisk viskositet gjør det. Viskositet er temperaturavhengig for væsker og minker når temperaturen øker. Kinematisk viskositet gis fra ligning 2.7.

$$\mu = \rho * \nu \quad [kg/m * s] \quad (2.7)$$

Pumpeeffekten er proporsjonal med trykkfallet og volumstrømmen i rørene, og kan beregnes etter ligning 2.8. Strømningens hastighet burde reguleres slik at den termiske motstanden minkes, samtidig som man må vurdere trykktapet for å redusere driftskostnadene til pumpen.

$$\dot{W}_{pumpe} = \frac{\Delta P * \dot{V}}{\eta_{pumpe}} \quad [kW] \quad (2.8)$$

Reguleringsventiler sin oppgave er å regulere væskemengden som går gjennom røret.  $K_v$  er kapasitetstallet til ventilen og er forholdet for gjennomstrømningen og  $\Delta P$ . Dette er trykkdifferansen mellom inngangstrykket før ventilen og utgangstrykket etter ventilen [36]. Denne trykkdifferansen representerer et energitap til væsken som strømmer gjennom ventilen.  $K_v$ - verdien finner man ved hjelp av ligningen 2.9.

$$K_v = 36 * \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta P}} \quad [-] \quad (2.9)$$

For å kunne beregne trykktap som forekommer på grunn av retningsendringer i komponenter som bend og forgreininger benytter man ligning 2.10. Trykktapene har fellesbetegnelsen 'støttap'.  $\zeta$  representerer støttapskoeffisienten og kan hentes fra datablader eller oppslagsverk.

$$Støttap = \zeta * \frac{\rho * v^2}{2} \quad [Pa] \quad (2.10)$$

Sammenhengen mellom væskemengde og trykktap gis ved ligning 2.11. Trykktapet endrer seg i 2.potens av endringen i volumstrøm. Det betyr at hvis volumstrømmen halveres vil trykktapet bli en 1/4.

$$\left(\frac{P_A}{P_B}\right) = \left(\frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_B}\right)^2 \quad (2.11)$$

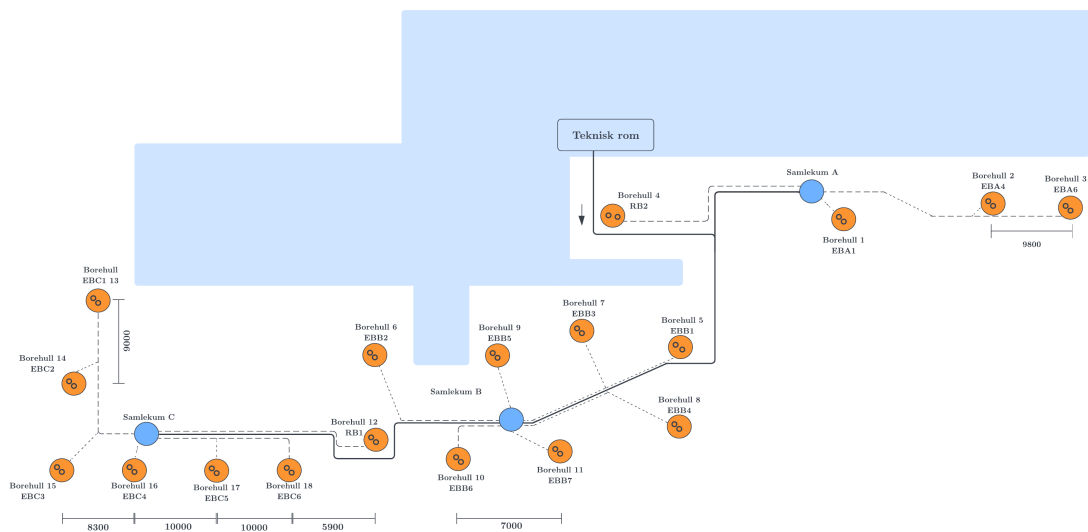
## 2.4 Brønnparken ved OKS

Denne oppgaven omhandler en brønnpark installert ved Oslo Kristine Senter (OKS) på Kjeller i Lillestrøm kommune. Firmaet Nordisk Energi Kontroll er totalentreprenør og selskapet RotoTec sto for geologiske undersøkelser, boring og installasjon av kollektorslangene. I teknisk rom er det installert fire NIBE 60 kW væske/vann- grunnvarmepumper. Grunnvarmepumpene har en sammenlagt effekt på 240 kW og skal levere 1 100 000 kWh/år. Etter installert grunnvarme er det estimert at byggets årlige energiforbruk vil minke med omtrent 700 000 kWh. Det er fra tidligere varmesystem installert en elektrokjele. Denne er beholdt og fungerer i dag som spisslast. Anlegget ble satt i drift september 2021 [11]. Systemskjema for OKS er vedlagt i vedlegg A.

Brønnparken består av 18 borehull av ulike dybde, 180- 310 meter, fordelt på tre samlekommer. Bakgrunnen for den varierende brønndybden er uklar, men studenten antar at det er grunnet de geologiske forholdene. Tabell 2.1 gir en oversikt over navn, dybde, diameter, satt volumstrøm ved installasjon og fordelingen til de forskjellige samlekommene. Figure 2.4 viser en oversikt over lokasjon energibrønnene og tilkopling samlekom. Lengdemålene er oppgi i millimeter. Total kollektorlengde for anlegget er 4810 meter, og borehullenes diameter 140 mm for at det skal være plass til tur/retur kollektorslange.

Samlekum	Navn	Dybde [m]	Diameter [mm]	Volumstrøm [l/s]
A	EBA1	310	45	0.720
A	EBA4	310	45	0.720
A	EBA6	180	40	0.720
A	RB1	265	45	0.720
<hr/>				
B	EBB1	310	45	0.720
B	EBB2	310	45	0.720
B	EBB3	250	40	0.620
B	EBB4	190	45	0.720
B	EBB5	250	40	0.620
B	EBB6	310	45	0.720
B	EBB7	293	45	0.720
<hr/>				
C	RB2	200	45	0.720
C	EBC1	250	40	0.720
C	EBC2	310	45	0.720
C	EBC3	310	45	0.720
C	EBC4	247	40	0.620
C	EBC5	200	40	0.620
C	EBC6	310	45	0.720

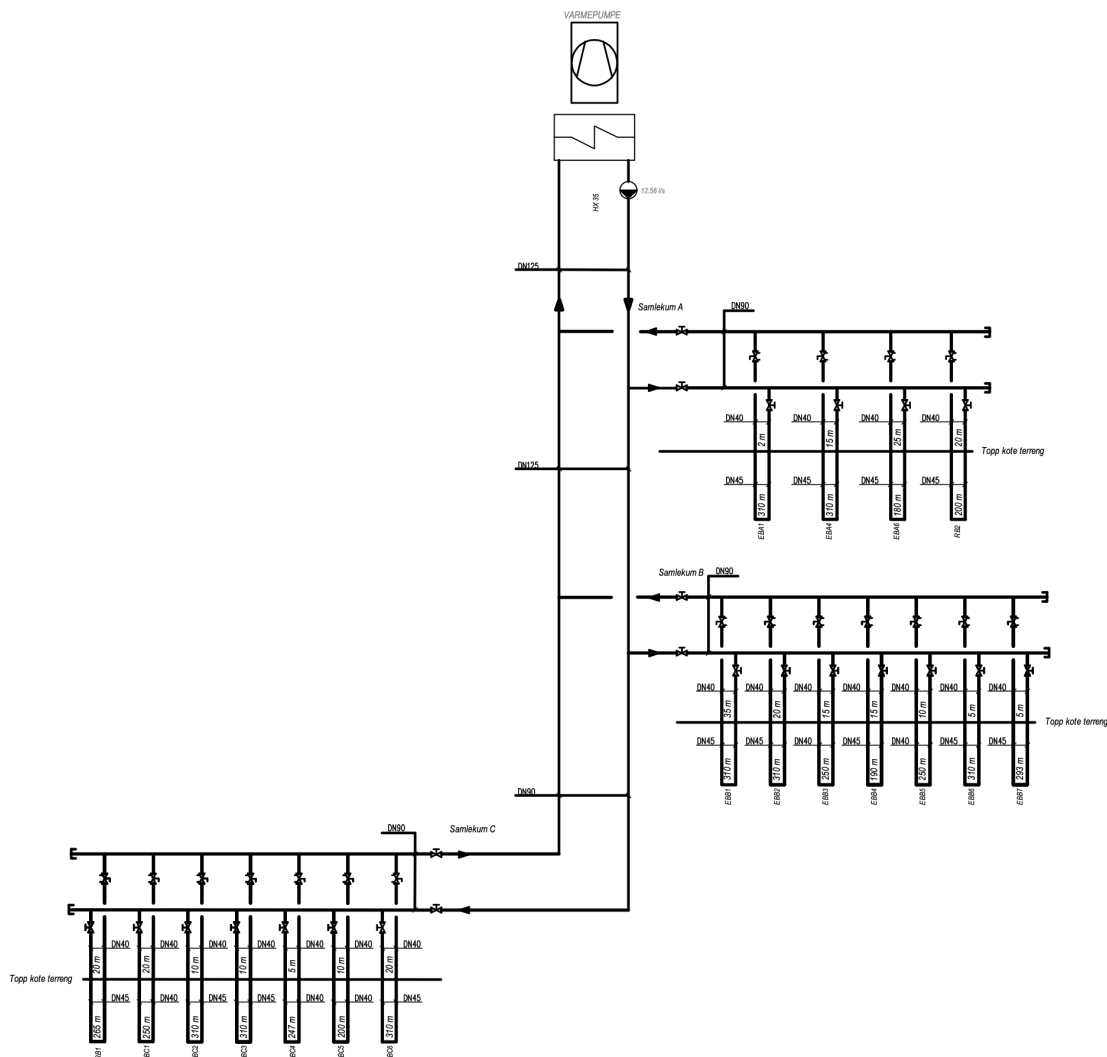
Tabell 2.1: Oversikt over samlekum, navn, dybde, diameter og volumstrøm ved OKS



Figur 2.4: Plassering av energibrønner



Figur 2.5 viser systemskjema for de 18 energibrønnene. Samlekummer er ikke tegnet. Det er installert stengeventil på tur og strupventil på retur i alle brønnene.



Figur 2.5: Systemskjema over brønnparken ved OKS

Fra NGU's interaktive kart [32] sees det at fjellgrunnen ved OKS består av glimmerskifer. Dette er en bergart hovedsakelig bestående av glimmer og kvarts [30]. Glimmerskifer har en varmeledningsevne på  $3.0 \text{ W/mK}$  [28], mens ren kvarts kan ha en varmeledningsevne på mer enn  $6 \text{ W/mK}$  [31]. Fra informasjon innhentet om borejobben, som ble utført av RotoTec, ble informasjon om grunnen notert som 'hvitt, svart og grått berg'. Det antas at hvitt berg representerer kvarts, svart berg er glimmerskifer og grått berg er av kombinasjon. Det antas at variasjonen av boreddybde er et resultat av berggrunnens innhold. OKS ligger i Lillestrøm kommune, tidligere Skedsmo kommune (-2020), hvor årsmiddeltemperaturen ligger på  $4.7^\circ\text{C}$  (1971- 2000) [1]. Da kan man anta at temperaturen i fjellgrunnen ligger et sted mellom  $6.2^\circ\text{C}$  og  $7.7^\circ\text{C}$ . Fra geologiske undersøkelser ble det målt dybden fra bakkenivå til fjell varier i område 24 meter til 37 meter. Dette er medvirkende til når man undersøker hvor mye energi per meter brønn det er mulig å hente ut. Oversikt over dybden per brønn, samt fjellgrunnen, ligger vedlagt i vedlegg H.

### 2.4.1 Sirkulasjonspumpe

En sirkulasjonspumpe sørger for sirkulasjon av arbeidsmediet i energibrønnene, og dimensjoneres etter anleggets minst gunstige krets der trykktapet er høyeste [25]. Pumpeeffekt regnes etter ligning 2.8, hvor virkningsgraden forteller hvor mye av den tilførte motoreffekten pumpen klarer å utnytte. Sirkulasjonspumpen sørger for at det alltid er turbulent strømning i alle kollektorene [24].

Sirkulasjonspumpen ved bergvarmeanlegget ved OKS er av typen Wilo-Stratos GIGA 80/1-32/4,1. Det er en ettrinns lavtrykksentrifugalpumpe [35]. Det betyr at den har to trinn; av eller på. Pumpen er drevet av en motor med nominell effekt på 4.1 kW. Det er kun en enkelt- pumpe installert for bergvarmeanlegget ved OKS. Bergvarmeanlegget er et lukket system med konstant mengde.

Systemskissen, datert 09.12.21, gitt av Nordisk Energikontroll oppgir at pumpen er dimensjonert for 216 kPa ved volumstrøm 12 l/s. Verdien for total volumstrømmen samstemmer ikke med verdien oppgitt i innreguleringsprotokollen på 12.56 l/s.



Figur 2.6: Wilo-Stratos GIGA 80/1-32/4,1.- hentet fra Wilo [35]

### 2.4.2 Regulering

Når et anlegg skal innreguleres må det først etableres hvilket rørstrekk som har høyest trykkfall. Det er som regel kretsen lengst ut i anlegget fra sirkulasjonspumpen. Dette blir da rørstrekket med indeksventil. Indeksventilen skal stå tilnærmet åpen og de andre kretsene reguleres etter denne. Utbalanseringen av trykk innebærer at parallellkoblede kretser skal ha samme trykk, uansett dimensjon på rør, ved ønsket mengde arbeidsmedium [27]. Ved innregulering av en parallellkoblet brønnpark skal hver brønn ha tilnærmet lik mengde [24].

Anlegget ved OKS er satt etter en trykktapsverdi som gir en total volumstrøm som oppfyller kravet for  $\Delta T$  lik 3K i varmepumpen. Dette er minimumsverdien for nødvendig trykk for sirkulasjonspumpen. Det er ikke mulig å ha en lavere verdi og fortsatt tilfredsstillende kravet til total volumstrøm lik konstant. Det har ikke blitt foretatt en ordentlig måling av volumstrømmene i kollektorene ved OKS, og som et resultat av dette er ikke strupeventilene korrekt regulert.

Energibrønnene leverer energi til de fire NIBE-varmepumpene. Sirkulasjonspumpen Wilo- Stratos GIGA 80/1-32/4,1 sirkulerer arbeidsmediet fra brønnparken til varmepumpene. Ved varmebehov starter varmepumpene og leverer varme ut på radiatorkretsen. Dersom varmepumpene ikke klarer å møte varmebehovet vil el-kjelen tilkobles som spisslast. Det skjer ved et styresignal fra varmepumpen. Temperaturen ut på varmekursene styres av en temperaturføler som en funksjon av utetemperatur. De fire varmepumpene er koblet som Master/slave. Antall varmepumper som er i drift avhenger av varmebehovet. Hvilken varmepumpe som operer varierer for å fordele slitasje.

### 2.4.3 Strømningsteknikk

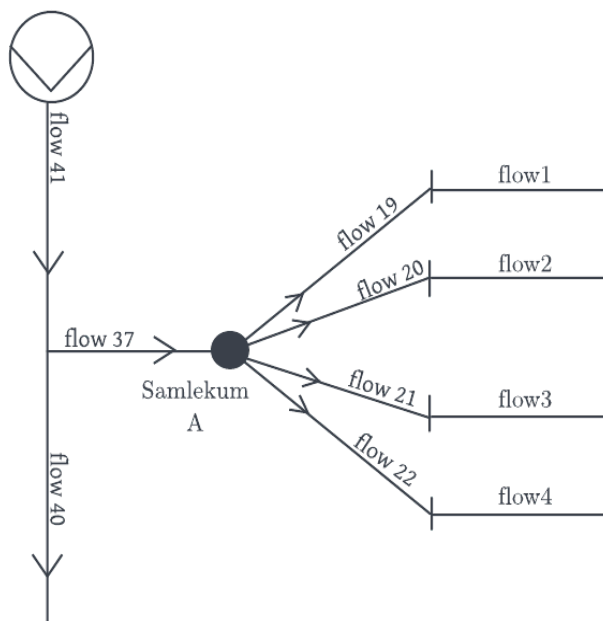
Strømningsteknikk er læren om fluid i bevegelse. I et rørsystem, uansett hvor komplekst, er det to hovedprinsipper innen strømningsteknikk som gjelder:

1. Bevaring av masse i systemet er oppfylt
2. Trykktapet mellom to knutepunkt er det samme i alle veier mellom de to knutepunktene.

Brønnparken ved OKS er koblet som et parallelt og lukket strømningssystem. Det betyr at volumstrøm inn er lik volumstrøm ut, og loven om bevaring av massestrøm oppfylles.

Figur 2.7 viser en forenklet versjon av hvordan arbeidsmediet fordeler seg i et nettverk som skal representere de fire borehullene tilknyttet samleikum A. Illustrasjonen fremstiller hvordan strømmingen forgreiner seg i brønnparken og sammenhengen mellom de forskjellige forgreningene og energibrønnene. *Flow 41* presenterer volumstrømmen som kommer ut fra pumpen. *Flow 37* er fordelergreinen fra hovedstokken som deretter splittes opp og fordeler seg i de fire energibrønnene (EBA1, EBA2, EBA3, RB1), her presentert som *flow1- flow4*. *Flow 40* er volumstrømmen som strømmer videre i systemet til resterende 14 brønnene som ikke er vist på tegningen.

Hvis man fyller systemet med væske og lar det gå en stund vil systemet oppnå at det er samme trykklfall i alle rørstrekke (  $\Delta P, L_1 = \Delta P, L_2 = \dots = \Delta P, L_{41}$  ). Ulempene med dette er man ikke har kontroll over volumstrømmene i kollektorene som kreves til å kunne benyttet anlegget til varmeutvinning. Dette løses ved regulering, som beskrevet i delkapittel 2.4.2



Figur 2.7: Forgrening for samleikum A

Sammenhengen mellom de forskjellige strømningsveiene kan defineres slik:

$$\begin{aligned} \text{flow 41} &= \text{flow 40} + \text{flow 37} \\ \text{flow 37} &= \text{flow 19} + \text{flow 20} + \text{flow 21} + \text{flow 22} = \text{flow 1} + \text{flow 2} + \text{flow 3} + \text{flow 4} \\ \text{flow 19} &= \text{flow 1} \\ \text{flow 20} &= \text{flow 2} \\ \text{flow 21} &= \text{flow 3} \end{aligned}$$

### 2.4.4 Energi

Med ligning 2.1 kan man beregne gjennomsnittlig varme som det er mulig å hente ut fra brønnparken. Med verdiene:

$$\begin{aligned}Cp_{HX35} &= 3755 \text{ J/kg}\cdot\text{K} \\ \dot{V} &= 0.01256 \text{ m}^3/\text{s} \\ \rho_{HX35} &= 953,4 \text{ kg/m}^3 \\ \Delta T &= 3 \text{ K}\end{aligned}$$

gir det

$$Q = 953,4 \text{ kg/m}^3 * 0.01256 \text{ m}^3/\text{s} * 3755 \text{ J/kg} * \text{K} * 3\text{K} = 134\,895 \text{ Watt}$$

Det gir en total effekt på 134 895 W, gitt at anlegget klarer å levere en  $\Delta T$  lik 3 K. Med total rørlengde på 4810 meter utgjør det i snitt 28 W/m for brønnparken ved OKS.

### 2.4.5 Samlekum

Grunnet størrelsen på grunnvarmeanlegget ved OKS, hvor det er lange strekk mellom energisentralen og de 18 borehullene, har det blitt valgt å benytte seg av samlekummer. Anlegget har totalt tre samlekummer, navngitt til A, B og C i denne oppgaven, med henholdsvis fire, syv og syv brønner. Se tabell 2.1 for oversikt.

Samlekummenes oppgave er å redusere trykkfallet i anlegget ved å minimere lengden av rør med liten diameter. Samlekummene er lokalisert i jorden med tilgang via et kumlukk for vedlikehold. Samlekummene installeres med stenge- og strupeventiler på henholdsvis tur/ retur for hver brønn og et system for avlufting [24]. Se figur 2.8 som eksempel på utformingen av en samlekum.

Ved planlegging av anleggsutforming er det et kostnadsspørsmål i valget mellom å benytte samlekummer eller lede varmpumperørene direkte tilbake til energisentralen. Man må vurdere om besparelsen av å utelate samlekummer går på bekostning av høyere drifts- og/eller investeringskostnader til sirkulasjonspumpen grunnet rørsystemets totale trykkfall [24].



Figur 2.8: Eksempel på utforming av samlekum - hentet fra MuoviTech.no [18]

### 2.4.6 Arbeidsmedium

Arbeidsmediet som benyttes i brønnparken er bioetanol HX35. Dette er en blanding bestående av vann (65%) og bioetanol (35%). Væsken er frostsikker til  $-17^{\circ}\text{C}$ . Mediet er produsert av fornybare råvarer fra land- og skogsbruk og ansees derfor som en miljøvennlig væske så lenge det behandles riktig ved deponering [4]. HX35 har tetthet på  $953 \text{ kg/m}^3$  og viskositet på  $3.67 * 10^{-6} \text{ kg/m * s}$  ved temperatur  $0^{\circ}\text{C}$ . Anlegget ved OKS inneholder 450 liter HX35.

Arbeidsmediet opererer med en inntemperatur på omkring  $0^{\circ}\text{C}$  ved OKS. Temperaturen varierer i løpet av årstidene. Hvis arbeidsmediets temperatur er for høy vil det ikke skje en varmeoverføring. Dersom arbeidsmediet er for kaldt risikerer man at grunnvannet rundt borehullene fryser til og man får et ikke- fungerende anlegg.

### 2.4.7 Varmepumperør

Varmepumperør er horisontale rør som transporterer arbeidsmediet fra toppen av brønnene til samlekum, videre til varmepumpen og tilbake. Rørene legges i grøfter 60- 100 cm dypt og fylles med masse for benyttelse. Rørene er av glatte plastikkør av typen PE, med lav relativ ruhet. Grunnet god isolering antas det at det ikke er varmetap mellom rør og grunn. Diameter på rørene benyttet ved OKS er 125 mm, 90 mm og 40 mm.

I borehullene er det installert turbokollektorer som varmevekslere. Turbokollektorer har en rillet innvendig rørvegg som skaper turbulent strømming ved lavere strømningshastighet. Ved OKS er diameterne 40 og 45 mm benyttet.

### 2.4.8 Reguleringsventiler

Reguleringsventilene benyttet for kollektorrørene er STAD 25 fra produsenten IMI TA. Det er lokalisert på retur, en per borehull. Se bilde 2.5. STAD reguleringsventiler er produsert for å kunne anvendes i varme- og kjøleanlegg, samt tappevannsanlegg. Rattet har digital avlesning som sikrer enkel innregulering. STAD 25 har et arbeidsområde mellom  $-20^{\circ}\text{C}$  og  $120^{\circ}\text{C}$ . Tabell 2.2 er hentet fra databladet for STAD 25 og viser  $K_v$ - verdiene med tilhørende rattinnstillinger. Rattinnstillinger presenterer åpningsgrad for ventilen. Ved rattinnstilling lik 0 er ventilen stengt, ved 4 er ventilen helt åpen.

Det er vanlig å regulere en ventil slik at det er et trykktap på 3 kPa som man definerer som åpen. Grunnen til dette er at hvis ventilen er helt åpent blir  $\Delta P$  lik null og det er ikke mulig å måle strømmingen over ventilen.

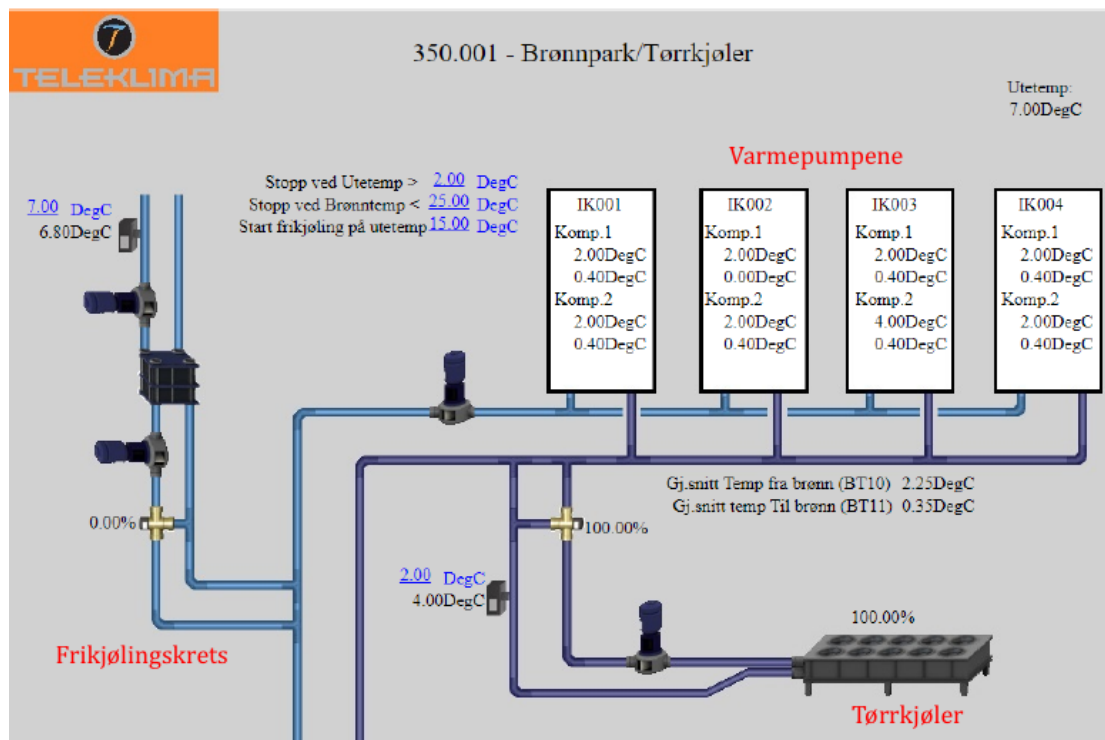
Rattinnst.	DN25
0.5	0.599
1	1.03
1.5	2.13
2	3.64
2.5	5.26
3	6.65
3.5	7.79
4	8.59

Tabell 2.2: Reguleringsventil STAD 25 med tilhørende rattinnstillinger og  $K_v$ - verdier

### 2.4.9 Frikjøling og tørrkjøler

Ved OKS benyttes frikjøling fra brønnparken til kjøling av ventilasjonsluft og en tørrkjøler til å lade borehullene. Ved høye utetemperaturer benyttes brønnparken til kjøling ved å utnytte kulden som lagres i grunnen gjennom fyringssesongen. Da er arbeidsmediet kaldt nok til at det kan kjøle ventilasjonsluften via en varmeveksler uten at det brukes energi fra en kjølemaskin [33]. Denne prosessen er tilnærmet gratis da den kun krever energi til pumpedrift og kalles derfor frikjøling eller passiv kjøling.

Tørrkjøleren har som oppgave å hente energi fra uteluften og tilføre den til borehullene. Uteluften trekkes over tørrkjøleren ved hjelp av vifter, og kjøles ned av arbeidsmediet fra borehullene som sirkulerer gjennom samme varmeveksler. Varmenenergi fra uteluften øker temperaturen til arbeidsmediet (HX35) [23]. Det nå oppvarmede arbeidsmediet kjøres tilbake i brønnene. Dette bidrar til å heve temperaturen i brønnene inn mot neste fyringssesong, og en sier at man 'lader' brønnene. Tilførselen av energi til borehullene fra uteluften skjer når temperaturen på uteluften er høyere enn temperaturen i grunnen. Hvis man henter ut for mye varme kan brønnene gå kalde, men med en tørrkjøler forlenges levetiden til brønnparken. Figur 2.9 viser et utklippsbilde av systemet ved OKS ved et tilfeldig tidspunkt. Frikjølingsanlegget ved OKS starter ved utetemperatur 15°C. Tørrkjøleranlegget igangsettes når gjennomsnittstemperaturen fra varmpumpene til brønn er lavere enn utetemperatur, og stopper når utetemperatur synker til under 2°C.



Figur 2.9: Oversiktsbilde av frikjølingskrets og tørrkjøler ved OKS

## 2.5 Trykkfall

Ligning 2.12 angir forskjellige bidragsyterne til trykkfallet i bergvarmeanlegget

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{rør} + \Delta P_{støttap} + \Delta P_{varmeveksler} \quad [Pa] \quad (2.12)$$

Normalt ansees trykktap på grunn av friksjon i rør til å være den største bidragsyteren. Ved små anlegg med mange forgreninger og komponenter kan støttap være den største bidragsyteren. Da grunnvarmesystemet ved OKS utgjør totalt 4810 meter med rør er det naturlig å anta at trykktap på grunn av friksjon er den dominerende faktoren til trykktap i systemet. Trykktapet over varmeveksleren (fordamper) er normalt antatt til å være 70 kPa.

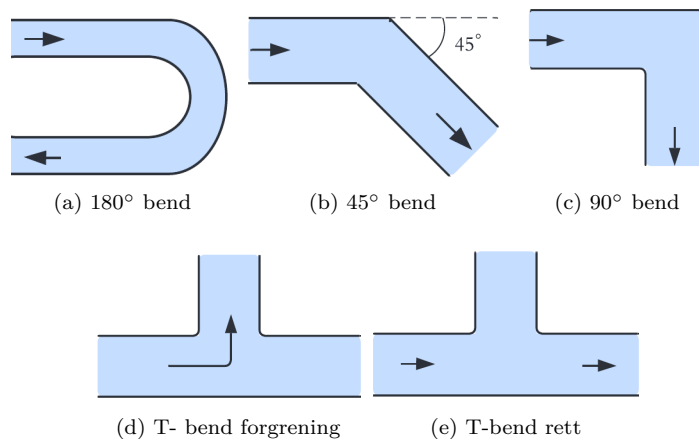
Støttap er trykktapet som oppstår på grunn av retningsendringer i komponenter som bend, ventiler, T-rør, utvidelse eller innsnevring av diameter. Dette forstyrrer strømmingen av fluidet og forårsaker ytterlige tap ved at fluidet fordeles og/eller blandes i komponentene [36].

Støttap beregnes etter ligning 2.10, hvor trykktapskoeffisienten ( $\zeta$ ) er et parameter som varierer ut ifra hvilken komponent man studerer.  $\zeta$  – verdien blir ofte oppgitt i produktdatablader. Komponentene funnet ved OKS er fremstilt i figur 2.10.

Trykktapskoeffisientene benyttet ved OKS, gjeldende for turbulent strømming, er hentet fra boken Fluid Mechanics [7] og samlet i tabell 2.3. Alle bendene er antatt myke <sup>1</sup> og flenset <sup>2</sup>.

Komponent	Trykktapskoeffisient ( $\zeta$ )
45° bend	0.4
90° bend	0.3
180° bend	0.2
T-bend (rett strømming)	0.2
T-bend (forgreining)	1.0

Tabell 2.3: Trykktapskoeffisienter



Figur 2.10: Oversikt over bend og forgreninger i anlegget ved OKS

<sup>1</sup>Vinklen til bendene har avrundede kanter

<sup>2</sup>Utvidet med en kant med feste

# Kapittel 3

## Metode

### 3.1 Valg av metode

Ved valg av metode ble det bestemt å benytte Matlab programvare. Med Matlab er det mulig å lage en matematisk utforming av strømningsmønsteret i brønnparken ved hjelp av matriser. På den måten ble hele systemet analysert i ett script, og en kan selv definere hvilke parametere som er relevante å hente ut.

Det ble konstruert to Matlab script; ett for brønnparken slik den er etablert og driftes i dag, og et script for optimalisering som bygger på det første scriptet, hvor utvidelsesverktøyet 'Optimization Toolbox' ble implementert. Det har blitt tatt utgangspunkt i brukermanualen 'Optimization toolbox- user's guide' [17] for å finne riktig funksjon, fremgangsmåte og oppsett. For begge scriptene har det blitt benyttet live script.

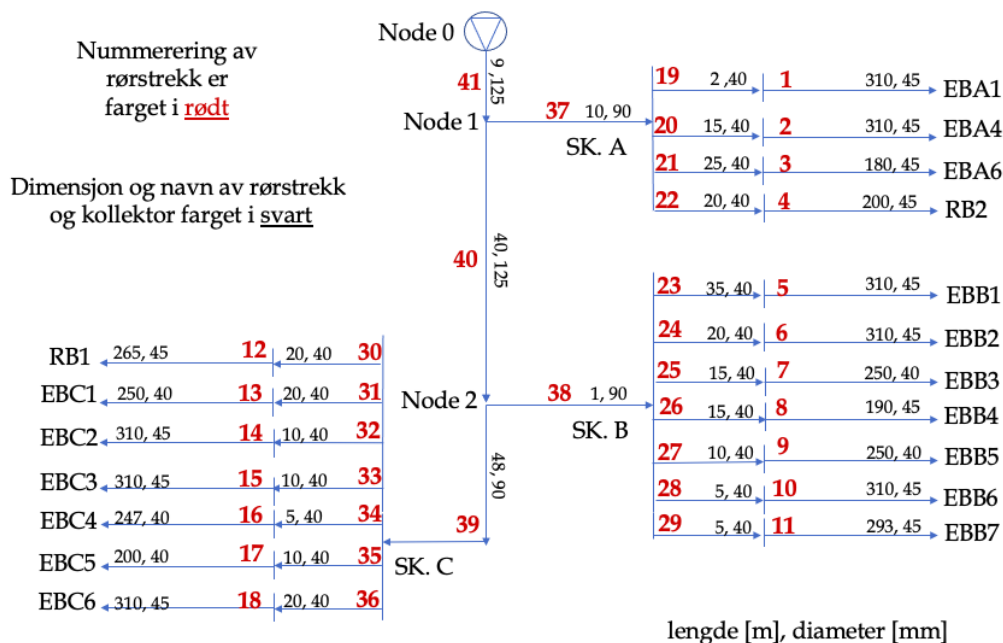
### 3.2 Oppbygning og nummerering

Det er brukt en deterministisk tilnærming. Det betyr at man setter en eller flere låste verdier som parametere som koden må oppfylle. I tilfelle for OKS er volumstrømmene i kollektorslagene ( $\dot{V}_1$  til  $\dot{V}_{18}$ ) etablert som låste verdier. Disse er presentert i tabell 2.1. Dette er refert til som 'deterministisk fremgangsmåte, scenario, modell, script og problem' gjennom oppgaven.

Da anlegget er symmetrisk med like lange strekk, samme tverrsnittsareal, bend og volumstrømmer for tur og retur, ble det kodet kun for tur og multiplisert med to for å få totalt trykkfall. Utvidelse eller innsnevring av rørdiameter har blitt utelatt.

Figur 3.1 viser nummereringen av rørstrekke. De første tallverdiene representerer dybden eller lengde i meter og tallene bak komma er rørdiameterne. Nummer 1- 18 representerer kollektorene og nummer 19- 36 er rørstrekke fra samlekummene til brønnene. Nummer 37- 41 er hovedstrekke fra teknisk rom og den videre fordelingen til samlekummene. Oppdelingen av rørstrekke skyldes ulike volumstrømmer, rørlengder- og diameterer. Dette er de 41 strekkene som har blitt kodet i Matlab. Hovedfokuset har vært på 1- 18, da trykkfallet i energibrønnene er kjernen i problemstillingen.





Figur 3.1: Navngiving av rørstrekk

I optimaliseringscriptet er volumstrøm over sirkulasjonspumpa er etablert som en begrensning. Det ble etablert tre optimaliseringsscenarioer hvor man utvider det tillatte arbeidsområdet for volumstrømmene i brønnene, uten at det overstiger total volumstrøm over pumpa.

#### Scenario 1:

Øvre- og nedre grenseverdi ble satt til å kunne variere fra dagens volumstrøm med  $\pm 0.02$  l/s

#### Scenario 2:

Øvre- og nedre grenseverdi ble satt til å variere fra dagens volumstrøm med +15 % etter -5% etter samtale med VVS- ingeniør Morten Eddie Jacobsen, daglig leder i Fabian AS.

#### Scenario 3:

Startvolumstrøm i problembørnen ble redusert og ny startverdi ble etablert som 0.63 l/s. Øvre- og nedre grenseverdi ble satt til å kunne variere fra dagens volumstrøm med  $\pm 0.02$  l/s. En mer detaljert forklaring blir presentert i delkapittel 3.8.

### 3.3 Forutsetninger og begrensninger

I beregningene er det gjort følgende forutsetninger og begrensninger:

- Trykkfallet over fordamperen er 70 kPa, oppgitt fra Nordisk Energikontroll at
- Matlab koden inkluderer ikke temperaturøkningen i anlegget
- Arbeidsmediet har en fast temperatur på 0°C, etablert ved tetthets- og viskositetsverdi for 0°C
- Frikjøling- og tørrkjøler er ikke inkludert i denne oppgaven
- Matlabkoden har blitt utviklet på det grunnlaget at anlegget er symmetrisk tur/retur. Derfor har trykktap som følge av utvidelse eller innsnevring av rørdiameter blitt utelatt
- En kollektor er røret i borehullet. Det er i kollektoren varmoverføring fra fjell til arbeidsmediet foregår
- Et 'strekke' er et fordelingsrør fra punkt A til B.
- Begrepene 'loop' og 'sløyfe' er synonymer, og er rørføringen fra sirkulasjonspumpen, ned gjennom energibrønnen og tilbake igjen til sirkulasjonspumpa i teknisk rom.

### 3.4 Matlab

Matlab er et dataprogram designet for å kunne løse numeriske beregninger og plott, samt visualisering av data. Navnet Matlab er en sammensetning av ordene 'matrix laboratory', som representerer programmets fokusområde og tyngde, nemlig matriser. Matlab har innebygde og ferdigkodete kommandoer og funksjoner [14]. Aktuelle funksjoner for å kunne løse oppgavens problemstilling blir presentert videre i dette kapitlet. I tillegg kan Matlab utvides ved å installere verktøykasser (toolboxes) ved behov for spesielle anvendelsesområder. Ved arbeid med denne oppgaven ble ekstrapakken 'Optimization Toolbox' installert og benyttet.

### 3.4.1 Navngiving i Matlab

Tabell 3.1 gir en oversikt over forkortelse og navngivingene som er blitt benyttet i Matlab. Tabellen har som funksjon å hjelpe leseren til få en bedre oversikt og forståelse av Matlab-scriptene som man finner i vedlegg C og D, samt beskrivelsen av arbeidsprosessen.

Forkortelse	Definisjon	Benevning
<b>DETERMINISTISK</b>		
FS	Strømningsstrukturen for hvert enkelt rør	$m^3/s$
F	Volumstrøm i forskjellige rørlenger	$m^3/s$
FC	Volumstrøm kollektorer	$m^3/s$
PS	Trykkstrukturen fra sirkulasjonspumpen og ut i hver enkelt brønn	Pa
Pmajor	Trykkfall grunnet friksjon	Pa
Pminor	Trykkfall grunnet støttap	Pa
Ptotal	Trykkfall (sum Pminor og Pmajor)	Pa
Trykkfall	Total trykkfall (sum Ptotal og Pdev)	Pa
<b>OPTIMALISERING</b>		
pm	Høyeste trykkfall	Pa
Pv	Summen av trykkfall over ventil grunnet struping og åpen ventil	Pa
Pdev	Trykkfall grunnet struping	Pa
P0major	Optimaliserte trykkfall grunnet rørlengde	Pa
P0minor	Optimaliserte trykkfall grunnet støttap	Pa
PO	Optimalisert trykkfall (sum P0minor og P0major)	Pa
Trykkfall	Optimalisert trykkfall (sum PO & Pdev)	Pa
x	Optimale volumstrømmer i hver enkel brønn	$m^3/s$
<b>FELLES FOR BEGGE</b>		
dP	Trykkfall for tur/retur grunnet friksjon og åpen ventil	Pa
Kv	Kv- verdier for strupeventil	-
$Kv_{max}$	Kv- verdien til åpen ventil = 8.59	-
Ratt	Rattinnstillinger	-
Pvinit	Trykktapet STAD25 utgjør	Pa
Trykkfall	Totalt trykkfall	Pa
Stot	Støttap	Pa
$\lambda$	Friksjonsfaktor	-
Re	Reynoldstall	-
L	Lengde rørstrekk	m
D	Diameter rør	m
V	Hastighet	m/s

Tabell 3.1: Navngiving i Matlab

### 3.4.2 Funksjoner i Matlab

#### **fminimax:**

Funksjonen 'fminimax' benyttes til å minimere det verste scenarioet for verdien til et sett med variable funksjoner, med utgangspunkt i et deterministisk problem. Dette kalles et "minimax"-problem, og formuleres i Matlab som funksjon 3.1. Oppbygning av funksjonen er hentet fra brukerguiden 'Optimization Toolbox' [17].

$$x = fminimax(fun, x, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (3.1)$$

$x, b, beq, lb$  og  $ub$ : vektorer

$A$  og  $Aeq$ : matriser

$fun$ : funksjon

Funksjon 3.1 løser problemet under betingelsen  $Aeq * x = beq$ .

$ub$  (*upper bound*) og  $lb$  (*lower bound*) definerer grenseområdet for det ønskede arbeidsområdet for ligningen. Funksjonen 3.1 definerer et sett av øvre- og nedre grenser for variabelen  $x$ . Funksjon gir en løsning som alltid er i områder  $lb \leq x \leq ub$ .

$A$  og  $b$  settes tomme:  $A = []$  og  $b = []$ , hvis ingen ulikheter eksisterer.

Funksjonen 'fminimax' har som default å foreta 100 iterasjoner  $x$  antall variabler. Det er mulig å utvide antall iterasjoner og 'step size' ved å benytte seg av funksjonen '*options*' = '*maxiterations*'. Iterasjonen angir når funksjonen konvergerer og 'Step Size' (trinnstørrelse) om toleransen av feil. Ved å utvide antall iterasjoner og minimere trinnstørrelsen blir ikke scriptet begrenset av antall trinn eller størrelsen på trinnene. Matlab informerer om det har funnet et globalt eller lokalt minimumspunkt.

**fzero:** Fzero prøver å finne punktet  $x$  hvor funksjonen  $fun(x)$  er lik null. fzero ble benyttet for å kunne løse Colebrook ligningen 2.5. I Matlab er funksjonen skrevet inn på formen:

$$\text{Friksjonsfaktoren} = \text{fzero}(fun, x0),$$

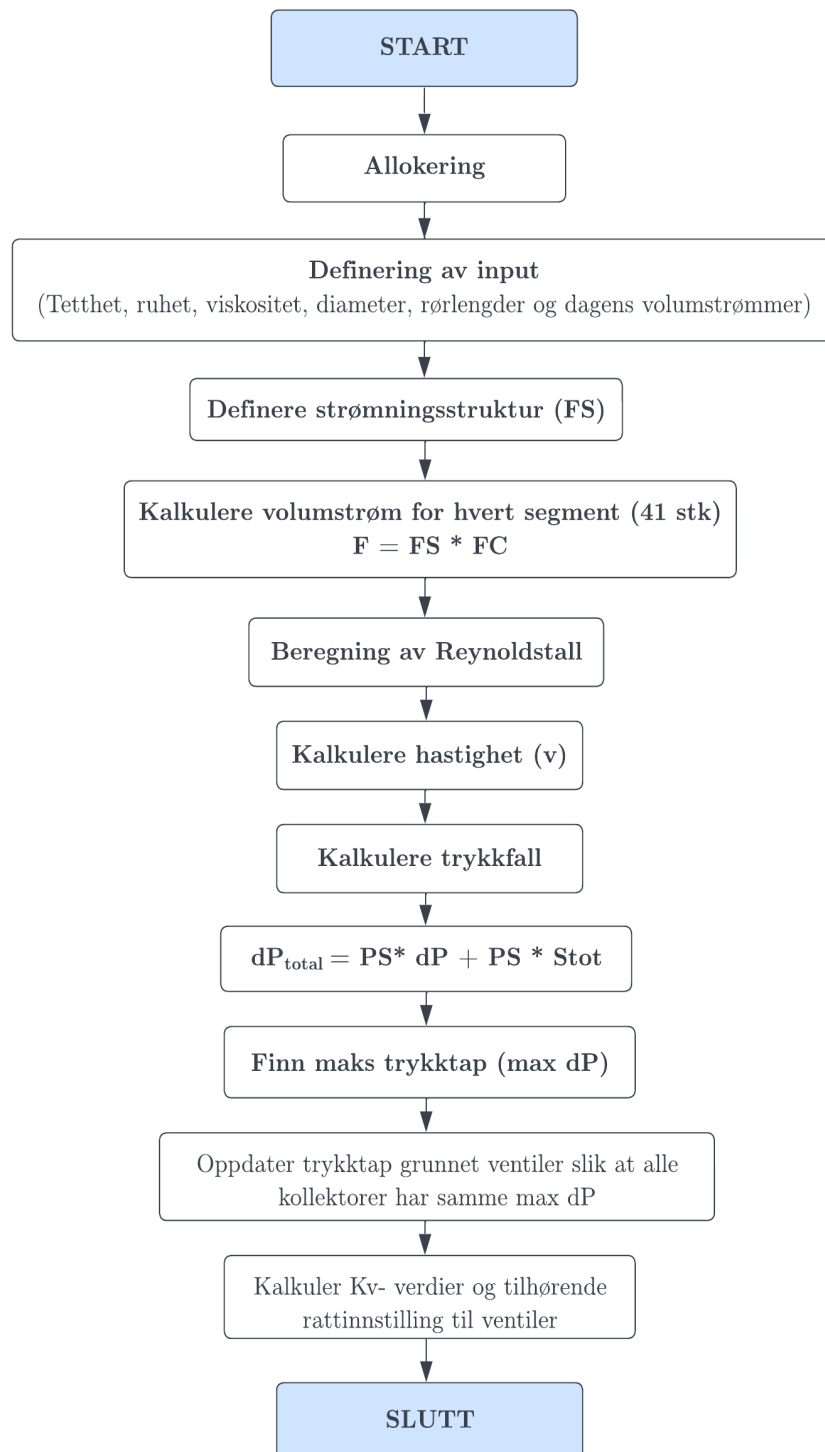
hvor  $x0$  er satt til å være 0.10. Dette er startverdien for iterasjonen. Startverdien er basert på verdier for hva friksjonsfaktoren kan være. Verdiene er hentet fra Moody diagrammet der friksjonsfaktoren kan gå fra 0.1 til 0.01. Det ble testet for lavere startverdier uten at det gjorde utslag på verdien til friksjonsfaktoren.

**Interp:** Interpolasjonsfunksjon som interpolerer for to sett med lineære tallverdier. Funksjonen ble benyttet ved beregning av rattinnstillinger, Kv- verdier og i parameterstudien.

## 3.5 Arbeidsprosessen

En grovskisse av arbeidsprosessen i Matlab er presentert i flytdiagrammene 3.2 og 3.5. Her blir prosessene fremstilt trinnvis. Først blir den deterministiske fremgangsmåten presentert med utfyllende informasjon, deretter optimaliseringsprosessen med tilhørende flytdiagram. Beskrivelsen av arbeidsprosessen følger den kronologiske rekkefølgen for hvordan oppgaven har blitt gjennomført. De forskjellige arbeidstrinnene vil bli forklart mer detaljert videre i dette delkapittelet.

## 3.5.1 Flytdiagram for deterministisk Matlab- script



Figur 3.2: Flytdiagram av arbeidsprosessen for deterministisk script

### 3.5.2 Gjennomgang av deterministisk Matlab- script

#### Allokering

Startprosessen hvor man definerer og klargjør hvilke parametere som er relevant og nødvendig å ha med. Allokering er ikke strengt nødvendig for et Matlab- script, men har blitt inkludert for å gi en bedre oversikt over de ulike parameterene og deres størrelse. Allokeringen er definert som matriser med 'zeros'- funksjonen.

#### Definering

Ved dette trinnet i prosessen dannes det en oversikt over kjente parametere. Aktuelle parameterne er: rørdiameter, rørlengder, dagens volumstrømmer, ruhet til rørene, tetthet og viskositet til arbeidsmediet. Informasjon har blitt levert fra Nordisk Energikontroll og hentet fra mobilappen 'HMI Tools'. Maks Kv- verdi for reguleringsventilene er også inkludert her.

#### Benevning

Omgjør volumstrøm og diameter til SI- enheter. Det korrigeres også for diameter ved å trekke fra veggtykkelse.

#### Definerer strømningsmønsteret

Det ble definert en oversikt for rørføringene og hvordan arbeidsmediet strømmer i brønnparken fra brinepumpa og ut i de 18 brønnene ved hjelp av matriser bestående av nuller og enere. Tallet 1 forteller at det går arbeidsvæske der, tallet 0 forteller det motsatte. Matrisen er kodet for å lage en matematiske oversikt av anlegget som enkelt viser hvordan arbeidsmediet fordeler seg i de fem hovedstrekene frem til de 18 energibrønnene.

$$\begin{matrix} Flow(37,:) \\ Flow(38,:) \\ Flow(39,:) \\ Flow(40,:) \\ Flow(41,:) \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrisen over definerer hvordan arbeidsmediet fordeler seg fra hovedstrekene 41 til 37. Strekk 41 og 40 er hovedledningene som fordeler seg til samlekkummer som videre forgreiner seg til samlekkummene. Flow 37 er mengden arbeidsmedium som går til samlekkum A som er koblet på brønnene 1-4, flow 38 er koblet til samlekkum B som er koblet på brønnene 5-11 og flow 39 er for samlekkum C med brønnene 11-18. Se figur 3.1 for en skjematisk fremstilling.

#### Hastighet (v)

Definerer en funksjon for hastighetene i den enkelte rørlengde ved en omformulering av ligning 2.3, hvor man løser for hastighet.

#### Reynoldstall (Re)

Implementerer formelen for Reynoldstall 2.6 for alle 41 rørstrekene. For å sjekke at kravet om  $Re > 4000$  ble opprettholdt i kollektorene, ble funksjonen 'min Re(1:18)' kodet og resultatene ble manuelt kontrollert. Det er kun et krav til turbulent strømning i kollektorslangene.

#### Trykkfall per meter (dP)

Trykkfall per meter rør ble innført som en egen funksjon [P] og ble definert som "trykk per meter". Det er en funksjon av diameter, ruhet, hastighet, tetthet og Reynoldstall, der Reynoldstallet og ruhet er faktorer i Darcy Weichsbach ligning 2.5 for friksjonsfaktoren f. Trykkfallet beregnes fra ligning 2.4 hvor lengden L blir en variabel ved å definere L som L(i). Kalkulasjonen ble utført gjennom en 'for'-løkke og multiplisert med to for å få trykkfallet tur/retur.

#### Trykkfall over reguleringsventil

For å beregne trykkfall over reguleringsventil ble det etablert en 'for'- løkke for de 18 kollektorene,

```
for i=1:41
    dP(i)=2*L(i)*trykk_pr_meter(D(i),Ru,V(i),tetthet,Re(i));
end
```

Figur 3.3: 'For'- løkke for trykktap for alle 41 rørstrekk

hvor trykkfallet grunnet rørlengde i kollektorene blir addert med trykkfallet som forekommer grunnet reguleringsventilen. Ligningen 2.9 for Kv- verdien blir løst for  $\Delta P$  og Kv- variabelen har blitt erstattet med  $Kv_{max} = 8.59$ . På den måten tillegger man trykktapet som STAD25-reguleringsventilen gir. 'FC' er volumstrøm i kollektorene. Enhetene har blitt omgjort fra kPa til Pa og fra  $m^3/s$  til l/s.

```
for i=1:18
    dP(i)= dP(i)+1000*(36*FC(i)*1000/Kvmax)^2;
end
```

Figur 3.4: 'For'-løkke for trykktap grunnet reguleringsventilene for de 18 kollektorene

### Støttap

Støttapet ble oppdelt etter de 41 strekkene. I tilfellene der et strekk hadde flere bend eller forgreininger, ble tilhørende støttapskoeffisienter addert slik at det resulterte i en  $[41 \times 1]$ - vektor. Det ble gjort for å forenkle implementeringen av støttap til strukturen for trykkfall som er en  $[18 \times 41]$ - matrise. Verdier for støttapskoeffisienter er fremstilt i tabell 2.3. Støttapet ble funnet ved en 'for'- løkke for ligning 2.9, hvor hastighet og støttapskoeffisientene er variabler.

### Trykkfall og indeksventil

Indeksventil er lokalisert på kollektoren med høyest trykkfall. Scriptet er kodet for at indeksventil skal stå helt åpen og de resterende 17 strupeventilene må reguleres etter denne slik at det er likt trykkfall i alle kollektorene.

### Oppdatering av $\Delta P_v$ (Pdev)

Deretter ble  $\Delta P$  oppdatert til å inkludere trykkfallene grunnet struping av reguleringsventilene som må til for at alle kollektorene skal ha samme trykkfall. Resultatene viste hvilken åpningsgrad som er nødvendig for å oppnå samme trykkfall i alle brønnene. Se avsnitt 3.6.1 for en mer detaljert forklaring.

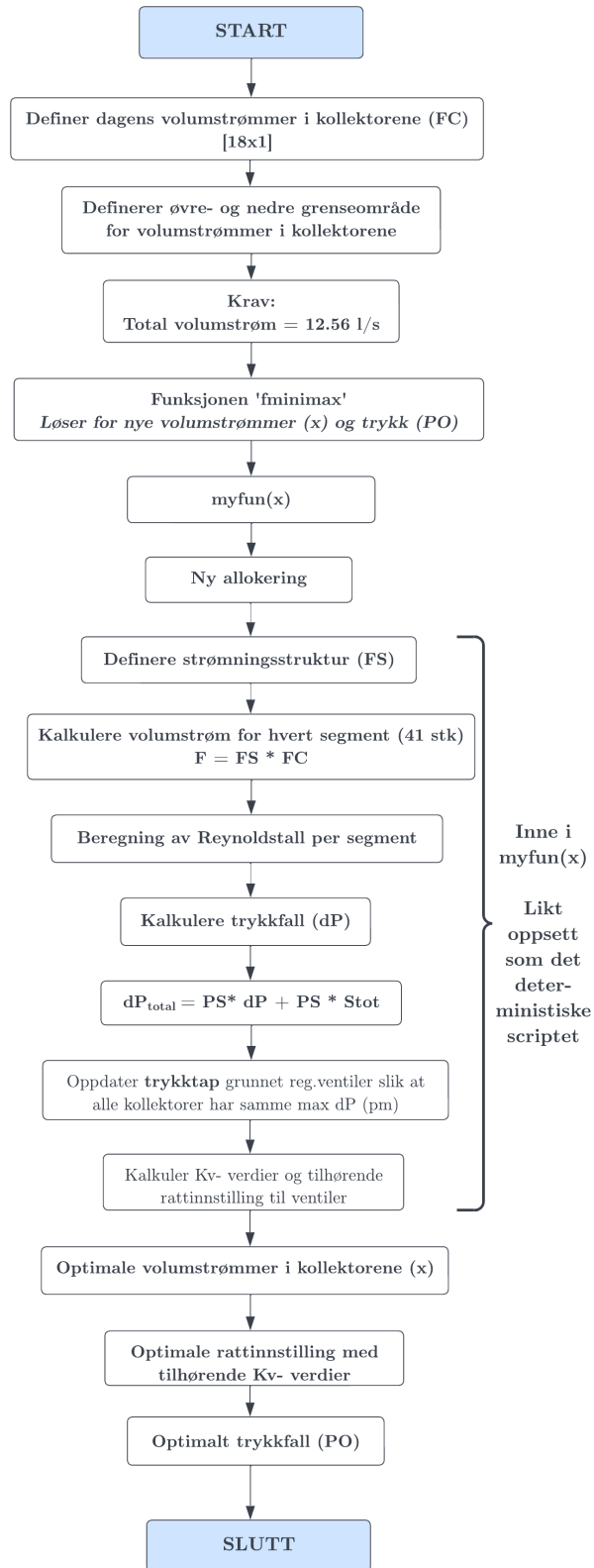
### Kv-verdier og rattinnstillinger

Kv-verdier med tilhørende rattinnstillinger ble kalkulert ved en 'for'- løkke med interpolering Kv-verdier og åpningsgrad av ventilene. Ligningen for Kv- verdi 2.9 ble utregnet i 'for'- løkka.

## 3.5.3 Arbeidsprossen i optimaliseringsscript

Optimaliseringsscriptet har et tilsvarende likt oppsett som det deterministiske scriptet og er bygd opp rundt det deterministiske scriptet. Flytdiagrammet i 3.5 er ment å gi en kort oversikt over arbeidsprosessen, før metoden videre blir beskrevet mer detaljert i dette delkapittelet.

## 3.5.4 Flytdiagram for optimaliseringsscriptet



Figur 3.5: Flytdiagram over arbeidsprosessen for optimaliseringsscriptet



**Funksjonen 'fminimax'**

Funksjonen 'fminimax', beskrevet i 3.4.2, ble etablert. Nå er volumstrømmene [18 x1] ikke lenger låste verdier, men variabler som skal optimaliseres. For å benytte seg av funksjonen 'fminimax' ble 'Optimizing Toolbox' installert i Matlab. Funksjonen 3.1 har nå formen:

$$[x, PO]=fminimax(myfun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub)$$

**myfun(x)** er det deterministiske problemet med ny allokering. Dette er funksjon som skal optimaliseres.

**x** er optimale volumstrømmer som gir lavest mulig trykktap. 'fminimax' løser for **x**.

**PO** er de optimale trykkene i kollektorene [18x1]. 'fminimax' løser for **PO**.

'**ub**' (upper bound) og '**lb**' (lower bound) representerer øvre- og nedre grenseområde man tillater optimaliseringsvariabelen å variere. Prenøk [24] forteller at volumstrømmene i et parallellkoblet grunnvarmeanlegg skal være så like som mulig. Derfor ble grenseområdet definert som smalt ( $\pm 0.02$  l/s) ved de første undersøkelsene, før det ble utvidet noe for scenario 2. Figur 3.6 viser hvordan det ble implementert for de forskjellige optimaliseringsscenarioene. **x0** er de ikke-optimaliserte volumstrømmene i kollektorene.

<code>x0=FC;</code>	<code>x0=FC;</code>
<code>lb=FC- 0.02/1000;</code>	<code>lb=FC-(0.05)*FC;</code>
<code>ub=FC+ 0.02/1000;</code>	<code>ub=FC+(0.15)*FC;</code>

Figur 3.6: Øvre og nedre grense i fminimax- funksjonen

**Aeq** er definert som en matrise av størrelsen [1x18] av ettall.

**beq** er summen av alle volumstrømmene i de 18 kollektorene og er den definerende parameteren, gitt ved **Aeq \* x =beq**. Det betyr at scriptet ikke kan overstige summen av **beq**, da dette er mengden som sirkulasjonspumpa er dimensjonert for.

Beskrivelsen av funksjonen 'fminimax', hentet fra [17], skriver at **A** og **b** skal stå tomme hvis ingen ulikeheter eksisterer.

**'Options'**

'Options' ble etablert for at søket etter optimalt resultat ikke skulle være begrenset av trinntoleranse og antall iterasjoner. Antall iterasjoner ble utvidet til 10000 og trinntoleranse ble satt til  $1 \times 10^{-9}$ .

**Objekt funksjon**

Hele det deterministiske scriptet er innlemmet i den objektive funksjonen, definert som funksjonen '**myfun(x)**'. Ved myfun(x) ble det kodet for hvilke parametre scriptet skulle løses for. Det ble dannet en ny allokering for skille verdier fra det deterministiske- og optimaliseringsscriptet fra hverandre. Se tabell 3.1 for en oversikt.

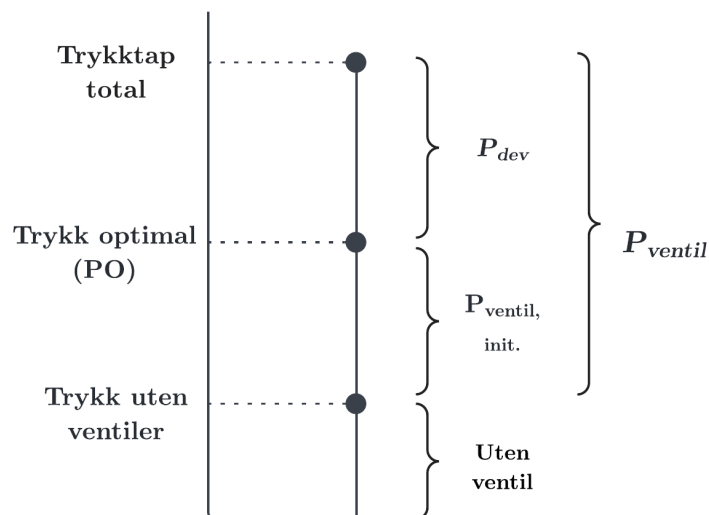
## 3.6 Trykkfallsberegninger

Dette delkapittelet gir en mer detaljert forklaring av hvordan trykktapet over reguleringsventiler og støttapsberegninger ble etablert i Matlab- scriptene.

### 3.6.1 Trykktap over reguleringsventiler

For å kunne finne korrekt  $K_v$ - verdi og tilhørende rattinnstilling må trykktapene på grunn av reguleringsventilene og trykkfallet grunnet struping forstås. Figur 3.7 viser en sammenheng mellom de forskjellige trykkene.

- Variabelen  $P_{v_{init}}$ . (kort for initial) er en omskrivning av ligning 2.9, hvor man løser for  $\Delta P$  og  $K_v$  er satt til  $K_{v_{max}}$ , som betyr helt åpen. Slik får man trykktapet som forekommer ved at det er installert en STAD 25- reguleringsventil i de 18 forskjellige sløyfene, basert på de forskjellige volumstrømmene.
- Optimalt trykk (PO) representerer de optimale trykkfallene i hver sløyfe når alle ventilene står åpne, altså før regulering.
- $P_{dev}$  (kort for 'deviation') er en variabel som tillegger trykkfallet som kreves for at alle sløyfene skal ha sammen trykkfall. For indeksventilen er  $P_{dev}$  lik null da den er åpen.
- $P_v$  (kort for  $P_{ventil}$ ) er summen av trykkfall ventil ( $P_{v_{init}}$ ) og trykkfall struping ( $P_{dev}$ ).



Figur 3.7: Sammenhengen mellom trykktap og ventiler i MatLab- script

Sammen er trykkfallet for de 18 sløyfene summen av:

1. Trykkfallet som selve ventilen utgjør.
2. Trykkfallet på grunn av struping.
3. Trykkfallet grunnet friksjon og støttap.

Med trykkberegningene foretatt var det mulig å finne  $K_v$ - verdier og rattinnstillinger. Dette ble løst ved en 'for' -løkke, fremstilt i figur 3.8. Ideell åpningsgrad ble funnet ved interpolasjon av de gitte verdiene.  $K_v$ - verdier og rattinnstilling ble hentet fra databladet for STAD 25 og finnes i tabell 2.2. Indeksventilen har  $K_v$ -verdi på 8.59 og rattinnstilling 4.0.

```

y=[0.599 1.03 2.13 3.64 5.26 6.65 7.79 8.59];
v=[0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4];

for i=1:18
    Ratt(i) = interp1(y,v,Kv(i),'linear');
end

```

Figur 3.8: 'For'- løkke med interpolasjon som gir rattinnstillinger

Hvor  $Kv(i)$  ble kodet i 'for'- løkke med ligning 2.9, der  $Pv(i)$  er trykkfallet over en strupet ventil.

```

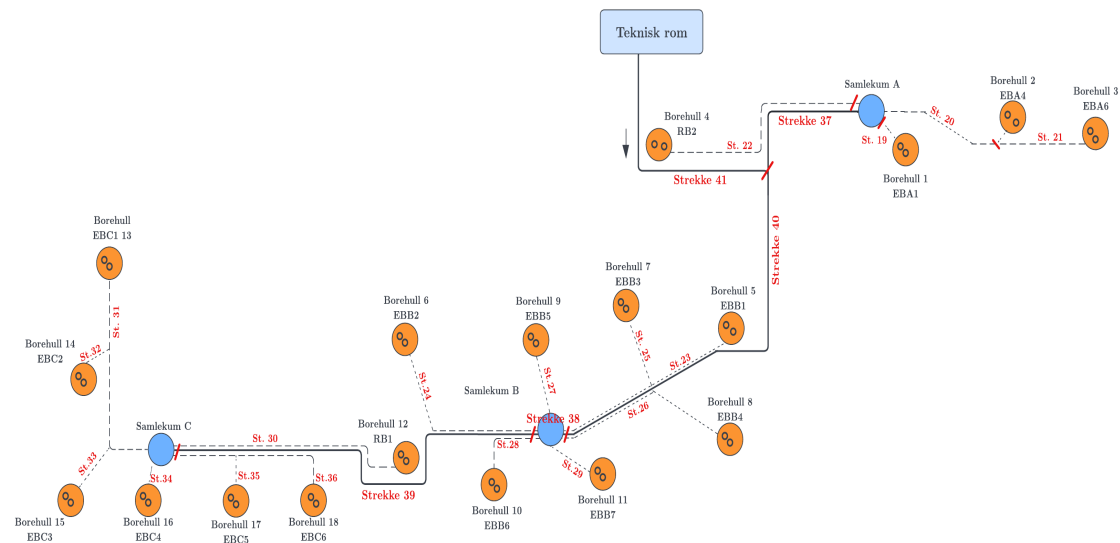
for i=1:18
    Kv(i)=36*x(i)*1000/sqrt(Pv(i)/1000);
end

```

Figur 3.9: 'For'- løkke som gir Kv- verdier

### 3.6.2 Støttap

Bend og forgreining ble funnet ved manuell inspeksjon av oversiktsbildet for brønnparken i vedlegg B. Bilde 3.10 er en illustrasjon med oppdelingen for de 41 strekkene og skal illustrere støttapene inkludert i beregningen av  $\Delta P_{støttap}$  i ligningen 2.12. En oppsummering av illustrasjonen er vedlagt tabell 3.2.



Figur 3.10: Oversikt over OKS med nummerering av strekker og støttap

Det ble funnet fem forskjellige typer bend og forgreininger ved OKS. De er grafisk fremstilt i 2.10. Bend og forgreininger ble manuelt funnet fra figur 3.10 og tilhørende trykktapskoeffisienter ( $\zeta$ ) ble lagt til for de 41 strekkene. Trykktapskoeffisientene ble kodet i Matlab- scriptene som konstanter.

Avgjørelsen om å inkludere støttap i Matlab- scriptene ble tatt noe tid ut i arbeidsprosessen. For å forenkle prosessen ble koden utformet slik at man fikk 41 elementer med støttap slik at det ble dannet en  $[41 \times 1]$ - vektor, som enkelt kunne multipliseres til den allerede etablerte  $[18 \times 41]$ - matrisen som utgjør strukturen for trykkfallet. Trykktap fra bend og forgreininger ble implementert i Matlab- scriptene ved hjelp av en 'for'- løkke for ligningen 2.10, hvor hastighet

og støttapskoeffisienter er variabler. Resultatene ble deretter addert til optimaliseringsvariabelen 'PO' som representerer trykkfall.

Strekk	Støttap	Strekk	Støttap
41	1 x 90° 1 x T-bend	29	1 x 45°
40	1 x 90° 2 x 45° 1 x T- bend rett	28	1 x 90°
39	4 x 90°	27	1 x 45°
38	1 x T- bend	26	1 x 45° 1 x 90°
37	1 x 90° 1 x T- bend	25	1 x 45° 1 x 90°
36	1 x 90°	24	1 x 45°
35	1 x 90°	23	1 x 45°
34	1 x 90°	22	1 x 90°
33	1 x 90° 1 x 45°	21	2 x 45°
32	1 x 90° 1 x 45°	20	3 x 45°
31	1 x 90°	19	1 x 45°
30	2 x 90°	1-18	1 x 180°

Tabell 3.2: Oversikt over strekk og tilhørende støttap

### 3.7 Parameterstudie

For å undersøke påvirkningen av rørenes ruhet, tettheten og viskositeten til arbeidsmediet ved forskjellige temperaturer ble det utført en parameterstudie. Målet var å undersøke hvordan nevnte faktorer påvirket trykkfallet. Parameterstudiet har blitt utført på det optimaliserte scriptet, men med låste verdier for volumstrømmer tilsvarende dagens drift. Resultatene ble sammenlignet med trykkfallet beregnet i det deterministiske scriptet. På denne måten oppnås et klarere bilde av hvor store besparelser det er mulig å oppnå sammenlignet med dagens verdier.

Parameterstudiet ble utført for frysevæskene HX24 og HX35 ved temperaturene  $-3^{\circ}\text{C}$  til  $+4^{\circ}\text{C}$ , og for vann med temperaturene  $1-4^{\circ}\text{C}$ . Temperaturene for frysevæskene som har blitt undersøkt ble bestemt i samråd med intern- og ekstern veileder. Hvis temperaturen på arbeidsmediet oversiger temperaturen i fjellet, vil det hindre varmeoverføringen. Man kan også anta at i disse periodene brukes heller brønnene til frikjøling eller sesonglagring av varme. Det ble foretatt undersøkelser ved flere temperaturer for å gi et best mulig bilde av temperaturens innvirkning på trykkfallet. Valg av vanntemperaturer er gjort på samme grunnlag som for frysevæskene. Relevant i denne sammenheng er også vannets frysepunkt på  $0^{\circ}\text{C}$ . Verdiene for tetthet og kinematisk viskositet ble hentet fra mobilappen 'IMI HyTools', og kravet om turbulent strømning med  $Re > 4000$  ble opprettholdt. Ved  $0^{\circ}\text{C}$  har HX24 en varmekapasitet på  $4004 \text{ J/kg} * K$  og HX35 en varmekapasitet på  $3755 \text{ J/kg} * K$ . Vann har en varmekapasitet på  $4200 \text{ J/kg} * K$  ved  $1^{\circ}\text{C}$ .

Parameterstudien ble utført på en videreutviklet versjon av det originale Matlab- scriptet, hvor hele det originale scriptet nå er definert som en funksjon som inneholder funksjonene '**inputParser**' '**varargin**'. Det ble opprettet en '**Parser**' objekt via 'inputParser' og lagt til parametere og deres spesifiserte til verdi via 'varargin'. inputParser lar deg administrere inndataparametere og definere dem som 'defaults' eller variable. Med 'Varargin' kan inndataparametere endres og 'hentes' fra celler. Det gjør at verdiene ikke behøves å endres manuelt for hver parameter man

ønsker å undersøke. Verdier for ruhet, og tetthet og kinematisk viskositet for nevnte temperaturer og arbeidsmedier ble samlet i celler. Disse ble nå behandlet som variabler, i motsetning til under trykkfallsundersøkelsene da de var låste verdier.

Det ble etablert to 'for'- løkker – en med temperatur som variabel og en med ruhet som variabel. Figur 3.11 viser oppsettet. 'OKS\_optimal\_parameterstudie' er filnavnet til scriptet hvor 'varargin'- funksjonen er implementert.

```
myRuCases = [0 0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 0.0005 0.0006 0.0007]; %meter

for i = 1:length(myRuCases)
    res_HX35{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Ru', myRuCases(i), 'Brine', 'HX35', 'T', 0);
    trykkfall_HX35(i) = res_HX35{i}.Trykkfall(1);

    res_HX24{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Ru', myRuCases(i), 'Brine', 'HX24', 'T', 0);
    trykkfall_HX24(i) = res_HX24{i}.Trykkfall(1);

    res_water{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Ru', myRuCases(i), 'Brine', 'water', 'T', 1);
    trykkfall_water(i) = res_water{i}.Trykkfall(1);
end
```

(a) Ruhet

```
myTEMPCases = [-3 -2 -1 0 1 2 3 4]; %celsius

for i = 1:length(myTEMPCases)
    res_HX35{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Brine', 'HX35', 'T', myTEMPCases(i));
    trykkfall_HX35(i) = res_HX35{i}.Trykkfall(1);

    res_HX24{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Brine', 'HX24', 'T', myTEMPCases(i));
    trykkfall_HX24(i) = res_HX24{i}.Trykkfall(1);
end

myTEMPCasesWater = [1 2 3 4]; %celsius
|
for i = 1:length(myTEMPCasesWater)
    res_water{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Brine', 'water', 'T', myTEMPCasesWater(i));
    trykkfall_water(i) = res_water{i}.Trykkfall(1);
end
```

(b) Temperatur

Figur 3.11: 'For'- løkke for parameterstudie av ruhet og temperatur

Matlab- scriptet i sin helhet som ble benyttet finner man i vedlegg F og inputverdier for kinematisk viskositet og tetthet finner man i vedlegg E.

## 3.8 Videre undersøkelser

Da det ble etablert hvilken sløyfe som hadde høyest trykkfall ble mulighetene for reduksjon undersøkt. Dette ble gjort ved å trinnvis redusere startverdien til problebrønnens volumstrøm (EBC1), fra 0.72 l/s til 0.62 l/s. Grenseområdet forble låst på  $\pm 0.02$  s/s og kriteriet for total mengde volumstrøm lik 12.56 l/s ble opprettholdt. Det ble også kontrollert for at Reynoldstallene i kollektorene aldri understeg 4000.

Ved å opprettholde kravene og unngå endring av øvre- og nedre grenseområde, og kun fokusere på problebrønnen, ble heller ikke det etablerte arbeidsområdet på 0.60 l/s- 0.74 l/s fra scenario 1 utvidet. Man er fremdeles innenfor Prenøk [24] sin definisjon av 'tilnærmet like volumstrømmer i energibrønnene'. Volumstrømmen i problebrønnen som ble valgt og studert er 0.63 l/s. Dette var volumstrømmen som ga høyest trykktapsreduksjon. Hele prosessen for trinnvis reduksjon av volumstrøm i problebrønn EBC1 blir ikke presentert i oppgaven, men verdier knyttet til ny startverdi vil bli presentert i resultatkapittelet og sammenlignet med de andre resultatene.

Det bemerkes at dersom volumstrømmen ble redusert til 0.62 l/s endret resultatet seg til at det var tre rørstrekk med indeksventil. Dette scenarioet ble av studenten antatt å gi en mer kompleks regulering med dårligere kontroll i en praktisk driftssituasjon. Scenarioet ble derfor forkastet, også med bakgrunn i masteroppgavens omfangs- og tidsbegrensing. Senere, etter videre undersøkelser og samtaler med fagkyndige, har det fremkommet at tre indeksventiler ikke gir dårligere regulering. I delkapittel 4.2.2.1, gis det en kort presentasjon av trykktapet som fremkom ved start volumstrøm i EBC1 lik 0.62 l/s.

# Kapittel 4

## Resultat

I dette delkapittelet vil resultatene for følgende undersøkelser blir presentert før de vil bli diskutert og analysert i kapittel 5. Diskusjon.

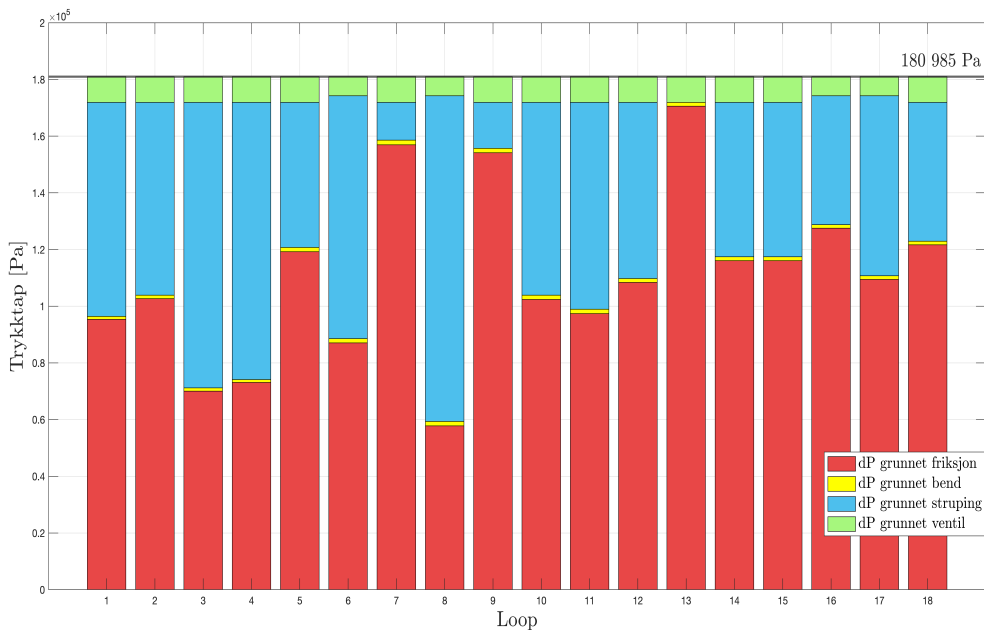
- Trykkfall fra deterministisk problem
- Optimalisert trykkfall for de tre optimaliseringsscenarioene
- Påvirkning av støttap
- Optimale volumstrømmer
- Åpningsgrad til STAD 25- reguleringsventiler
- Reynoldstall
- Pumpekaraktertistikk
- Energibesparelser knyttet til pumpedrift
- Parameterstudie av innvirkningen ved ruhet, temperatur og arbeidsmedie

Trykktapet over fordamperen er ikke mulig å redusere, og har derfor ikke heller blitt inkludert i Matlab- scriptene. Dette trykktap er ikke blitt tatt med i presentasjonen av resultatene som fremkom i Matlab, men har blitt inkludert under kulepunktene: 'Pumpekaraktertistikk' og 'energibesparelse knyttet til pumpedrift'.

### 4.1 Deterministisk problem

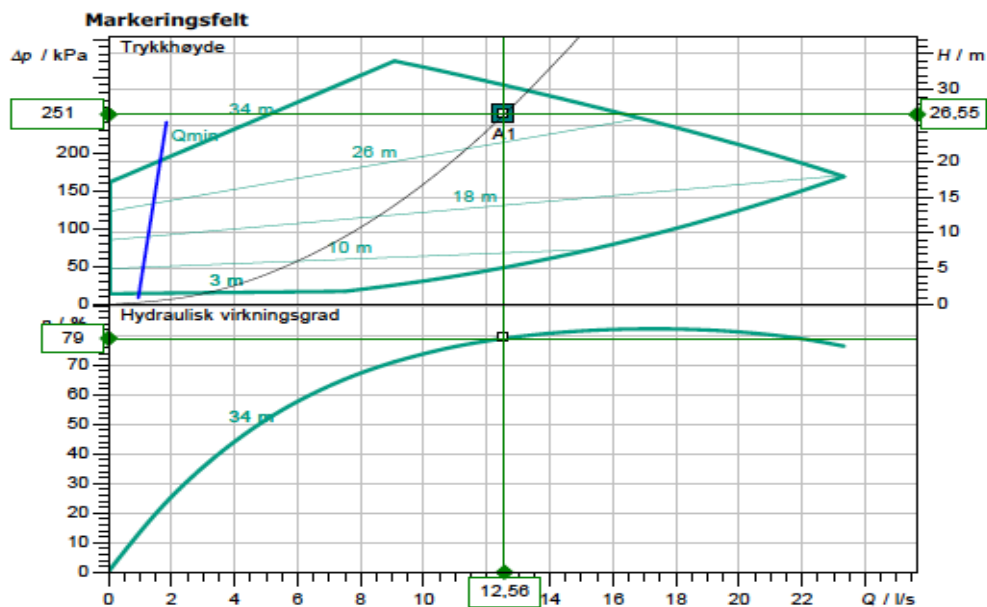
Matlabs utregninger viser rørsøyfen med kollektor EBC1 (brønn 13) har det høyeste trykkfallet. Energibrønnen er lokalisert lengst unna sirkulasjonspumpen i antall meter så er det derfor ikke overraskende. Brønnen er et relativt dypt borehull med en dybde på 250 meter og har installert en kollektorslange med diameter 40 mm. Fluidet i brønnen har en volumstrøm på 0.72 l/s. Altså; lang rørføring, stor dybde, liten diameter og høy volumstrøm. Det gjorde sløyfen til brønn EBC1 med tilhørende ventil til indeksventil. Trykktapet for sløyfen utgjorde 180 985 Pa pluss 70 000 Pa over fordamperen. Det gir et totalt trykkfall på 250 985 Pa som sirkulasjonspumpen må drifte. Av totalt trykkfallet i anlegget utgjorde støttap 2.53%.

Figur 4.1 viser fordelingen av trykkfall når fordamperen ikke er inkludert. For sløyfen ('loop') 13 ser man at det er ingen trykkfallsbidrag grunnet struping i reguleringsventilen, da denne er indeks. Resultatene er fremkommet med verdiene gitt i tabell 2.1.



Figur 4.1: Fordeling av trykktap for deterministisk problem

Figur 4.2 viser pumpekarakteristikken for en Wilo Stratos GIGA sirkulasjonspumpe. Trykktapet funnet med dagens volumstrømmer var for å høyt til at en 4.1 kW motor kunne klare det. Pumpekarakteristikken er derfor for en Wilo Stratos GIGA 80/1-37/ med 5.3 kW motor. Sistnevnte pumpe har et effektbehov på 4.35 kW og en hydraulisk virkningsgrad på 79% ved trykktap på 251 kPa. Dette scenarioet vil bli benyttet som sammenligningsgrunnlag ved undersøkelser for pumpebesparelse.



Figur 4.2: Pumpekarakteristikk for GIGA WILO 80/1- 37/5,3 sirkulasjonspumpe med deterministisk undersøkelse



## 4.2 Optimalisering

Optimaliseringscriptene er kodet for å gi de optimale volumstrømmene i kollektorslangene som gir lavest mulig totale trykkfall, gitt forutsetningene. Som tidligere nevnt i kapittel 3.2 er de tre undersøkte scenarioene:

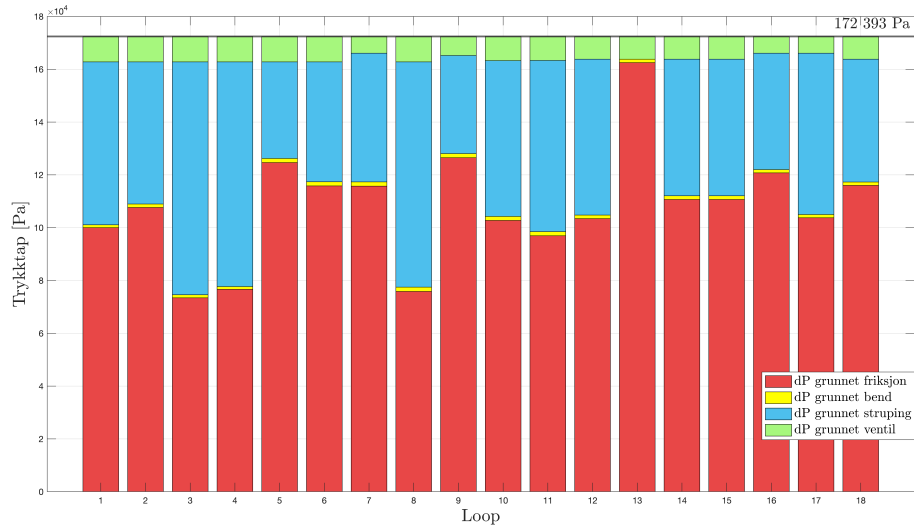
1. Øvre- og nedre grenseverdi for volumstrømmene i kollektorene er satt til å kunne variere med  $\pm 0.02$  l/s av dagens volumstrøm.
2. Øvre- og nedre grenseverdi for volumstrømmene i kollektorene er satt å kunne variere med + 15% eller -5% av dagens volumstrøm.
3. Øvre- og nedre grenseverdi for volumstrømmene i kollektorene er satt til å kunne variere med  $\pm 0.02$  l/s av dagens volumstrøm, men start volumstrømmen i problebrønn 13 (EBC1) har blitt redusert fra 0.72 l/s til 0.63 l/s.

### 4.2.1 Trykktap

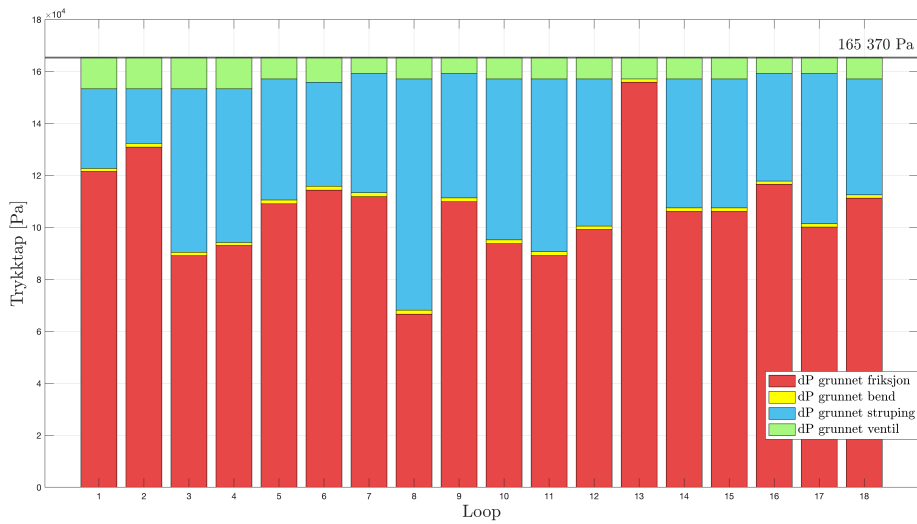
Det totale trykkfallet som skyldes friksjon- og støttap, samt over varmeveksleren i varmpumpa defineres som  $\Delta P_{total}$ . Summen av det totale trykktapet i anlegget finner man ved å anvende ligning 2.12, hvor  $\Delta P_{rør}$  og  $\Delta P_{støttap}$  beregnes i Matlab, og  $\Delta P_{varmeveksler}$  er en konstant.

Figur 4.3 viser en oversikt over de optimaliserte trykkfallene og hvilken påvirkning de forskjellige komponentene bidrar med. Rød farge viser trykkfall grunnet friksjon i rør, gul representerer støttap grunnet bend og forgreininger, og grønn er trykkfallet som en åpen reguleringsventil tilfører. Blå er trykktapet som tillegges de forskjellige kollektorene ved strupeventilene slik at alle brønnene får samme trykkfall. Det er viktig å merke seg at resultatene er trykkfallet i sløyfen gjennom brønn tur/retur pumpe. Trykkfallet over fordamperen er det samme i alle scenarioene så har derfor blitt utelatt i fremstillingene.

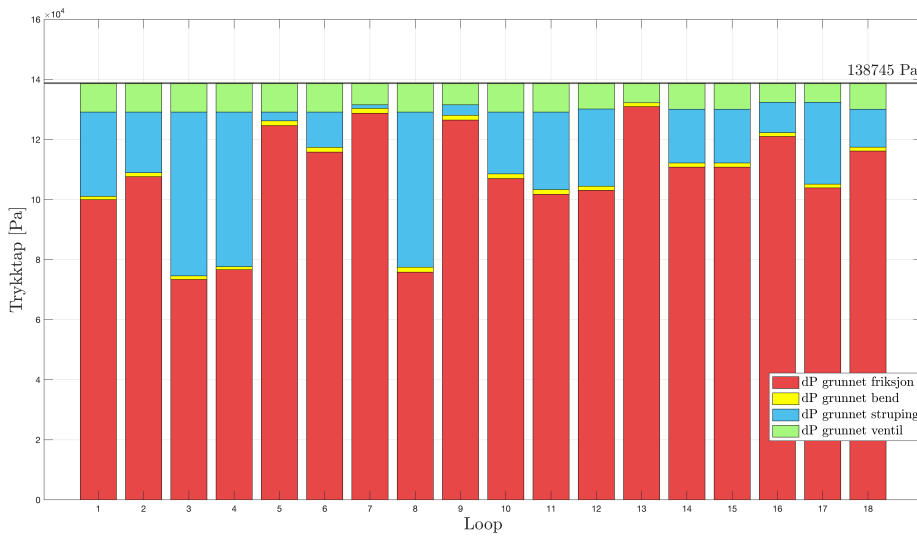
Felles for alle scenarioene er at trykkfall grunnet friksjon er den dominerende parameteren, og at brønn 13 er indeks. Dette kommer tydeligst frem i scenario 3, figur 4.3 c). Endringen ved volumstrøm i problebrønn resulterte at trykkfallene i de 18 sløyfene er mer uniforme enn ved scenario 1 og 2. Felles for alle er at støttap utgjør en liten prosentandel, på henholdsvis 2.66%, 2.81% og 3.32%. Samlekummer, stoppeventiler i kollektorene på retur og innsnevring og utvidelser av rørdiameter har blitt utelatt fra støttapsberegningene. Påvirkningen av dette er vurdert i kapittel 5: Diskusjon.



(a) Scenario 1: Dagens volumstrøm ± 0.02 l/s



(b) Scenario 2: Dagens volumstrøm +15 % / -5 %



(c) Scenario 3: Endret volumstrøm i EBC1 + Dagens volumstrøm ± 0.02 l/s

Figur 4.3: Trykktapfordeling for de tre optimaliseringsscenarioene

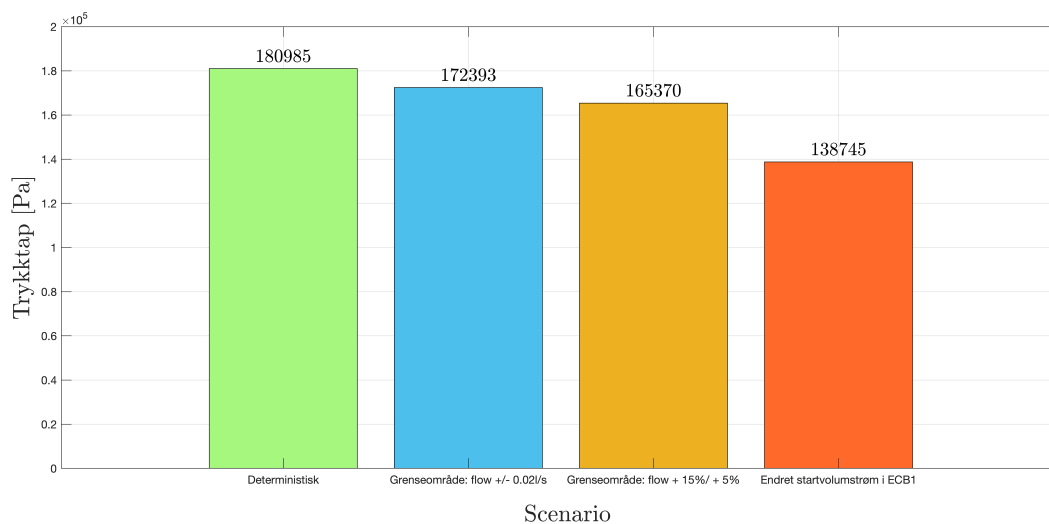
### 4.2.2 Trykktapsreduksjon

Med den deterministiske modellen som sammenligningsgrunnlag ble det funnet at det var mulig å redusere trykkfallet i alle tre optimaliseringsscenarioene. De oppnådde trykktapene er fremstilt figur 4.4.

For scenario 1, hvor volumstrømmene kunne variere med  $\pm 0.02$  l/s, fremkom det at det er mulig å minimere trykkfallet med 4.75 %. Totalt trykkfall er presentert i blå stolpe i figur 4.4

For scenario 2, hvor volumstrømmene kunne variere med + 15 % og -5 %, ga det en trykkfallsreduksjon på 8.3 %. Scenario 2 er presentert ved oransje stolpe i figure 4.4.

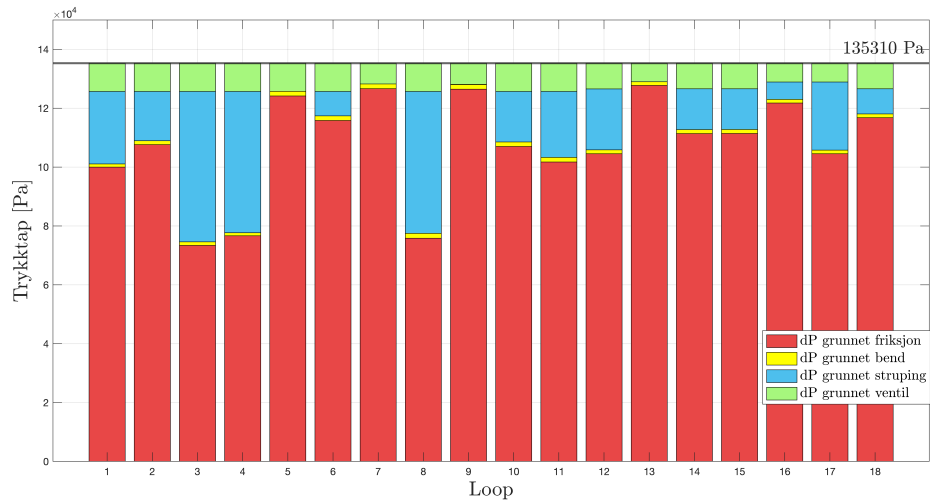
I scenario 3 ble først volumstrømmen i problebrønn (EBC1) senket fra 0.72 l/s til 0.63 l/s, deretter ble arbeidsområdet fastsatt til å kunne variere med  $\pm 0.02$  l/s (tilsvarende som i scenario 1). Det resulterte i at det totale trykktapet kunne reduseres fra 180.9 kPa til 138.7 kPa, noe som utgjorde en besparelse på 23.3 %. Scenario 3 er presentert ved rød stolpe i figur 4.4. Dette var scenarioet som ga den største trykktapsreduksjonen.



Figur 4.4: Sammenligning av trykktap for den deterministiske modellen og de tre optimaliseringsscenarioene

#### 4.2.2.1 Alternativt driftsscenario

Med reduksjon fra 0.72 l/2 til 0.62 l/s i problembønn 13 (EBC1) og optimalisert med grenseområdet  $\pm 0.021/s$ , resulterte i et totalt trykfall på 135 310 Pa. Ved dette driftsscenario fikk anlegget totalt tre indeksventilen. Trykktapsreduksjonen var liten sammenlignbar med scenario 3, da det var bare 3400 Pa som skilte dem. For å begrense oppgavens omfang er ikke dette driftsscenarioet undersøkt videre.



Figur 4.5: Trykktallsfordeling til forkastet scenario

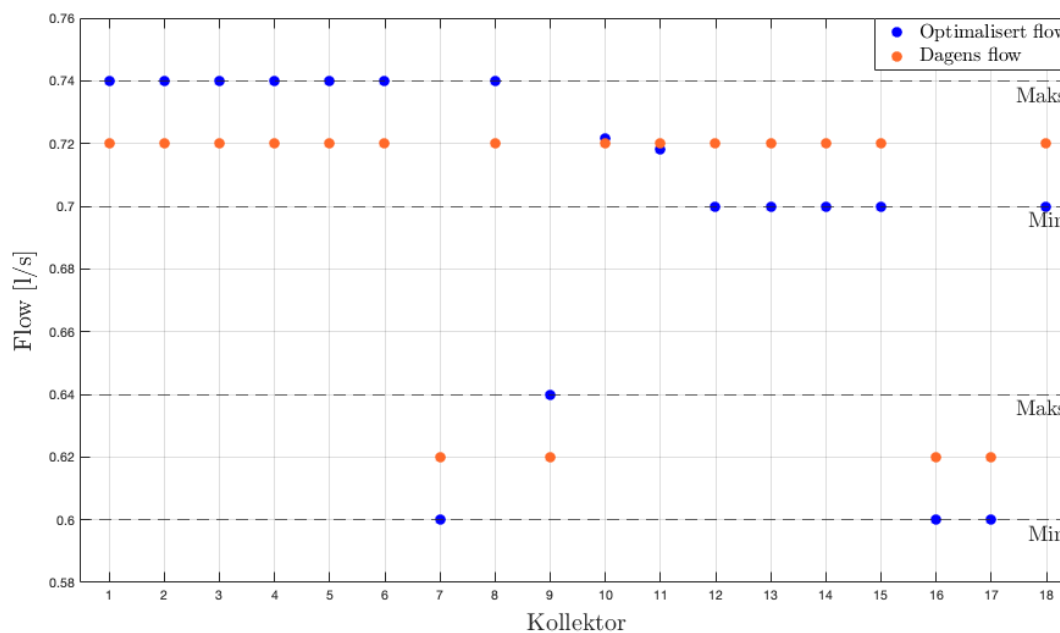
### 4.2.3 Volumstrømmer

I dette delkapittelet blir de optimale volumstrømmene som ble funnet fra de tre scenarioene presentert. Tabell 4.1 er en oppsummering av figurene 4.6, 4.7 og 4.8. Tabelloverskriften 'Grenseverdi' presenterer hvor volumstrømmen la seg innen det tillatte arbeidsområde for de forskjellige scenarioene.

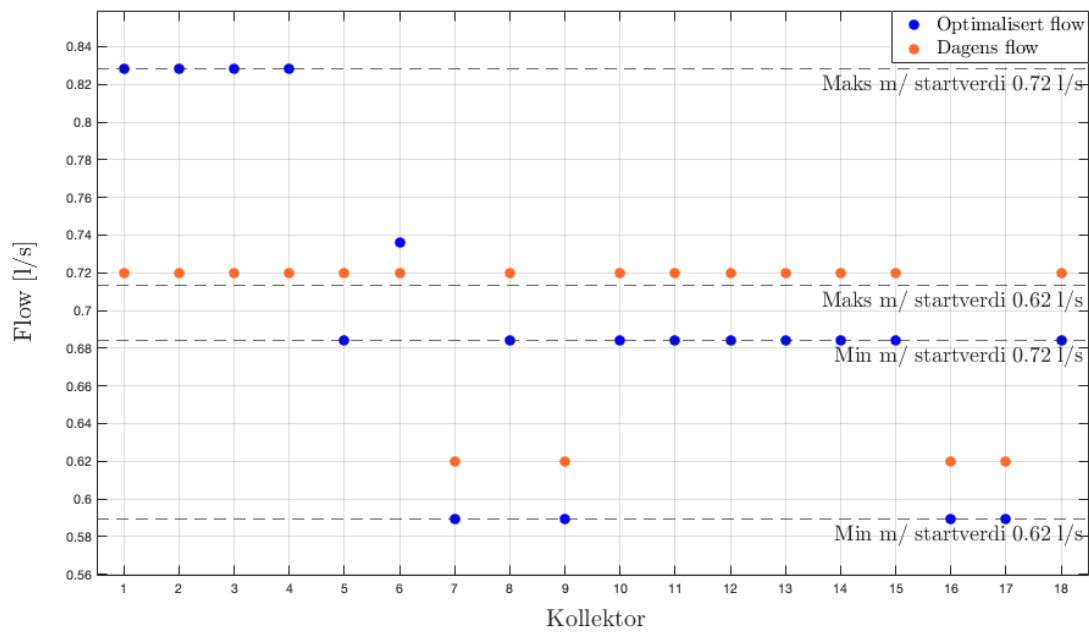
Nr.	Navn	Dagens $\dot{V}$	Scenario 1	Grenseverdi	Scenario 2	Grenseverdi	Senario 3	Grenseverdi
1	EBA1	0.720	0.740	Øvre	0.828	Øvre	0.740	Øvre
2	EBA4	0.720	0.740	Øvre	0.828	Øvre	0.740	Øvre
3	EBA6	0.720	0.740	Øvre	0.828	Øvre	0.740	Øvre
4	RB2	0.720	0.740	Øvre	0.828	Øvre	0.740	Øvre
5	EBB1	0.720	0.740	Øvre	0.684	Nedre	0.740	Øvre
6	EBB2	0.720	0.740	Øvre	0.736	-	0.740	Øvre
7	EBB3	0.620	0.640	Øvre	0.589	Nedre	0.640	Øvre
8	EBB4	0.720	0.740	Øvre	0.684	Nedre	0.740	Øvre
9	EBB5	0.620	0.640	Øvre	0.589	Nedre	0.640	Øvre
10	EBB6	0.720	0.7218	-	0.684	Nedre	0.740	Øvre
11	EBB7	0.720	0.7182	-	0.684	Nedre	0.740	Øvre
12	RB1	0.720	0.700	Nedre	0.684	Nedre	0.700	Nedre
13	EBC1	0.720	0.700	Nedre	0.684	Nedre	0.610	Nedre
14	EBC2	0.720	0.700	Nedre	0.684	Nedre	0.702	-
15	EBC3	0.720	0.700	Nedre	0.684	Nedre	0.702	-
16	EBC4	0.620	0.600	Nedre	0.589	Nedre	0.602	-
17	EBC5	0.620	0.600	Nedre	0.589	Nedre	0.602	-
18	EBC6	0.720	0.700	Nedre	0.684	Nedre	0.702	-

Tabell 4.1: Optimale volumstrømmer

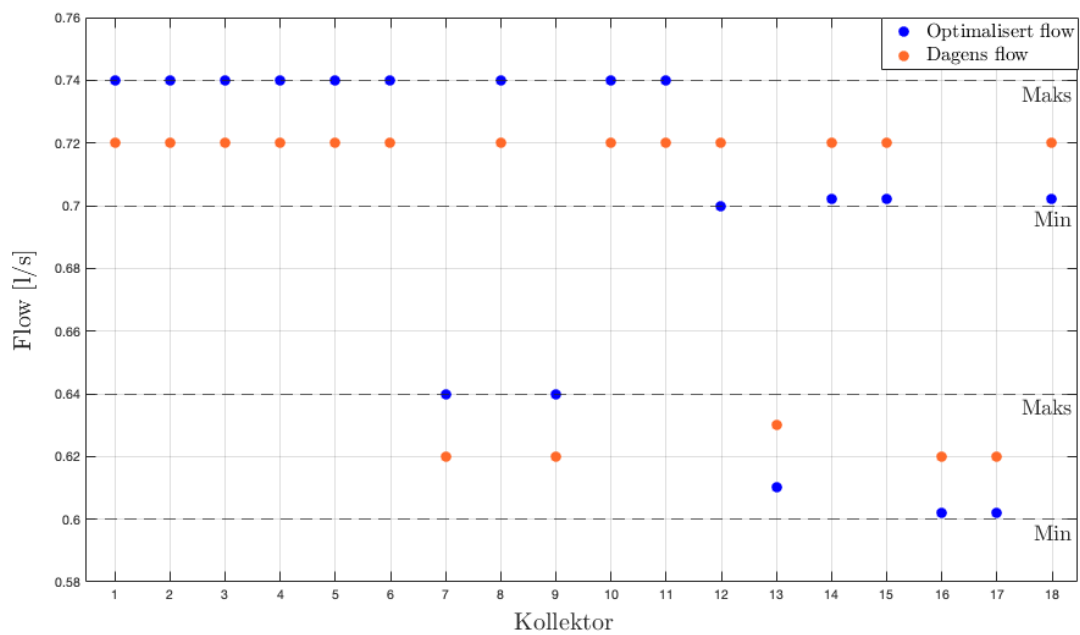
Figurene 4.6, 4.7 og 4.8 er grafiske fremstillinger av de optimaliserte volumstrømmene i de 18 forskjellige kollektorene. De horisontale linjene navngitt med *min* og *maks* presenterer øvre og nedre grense til arbeidsrområdet til volumstrømmene, som varierer i de forskjellige scenarioene.



Figur 4.6: Optimale volumstrømmer for scenario 1



Figur 4.7: Optimale volumstrømmer for scenario 2

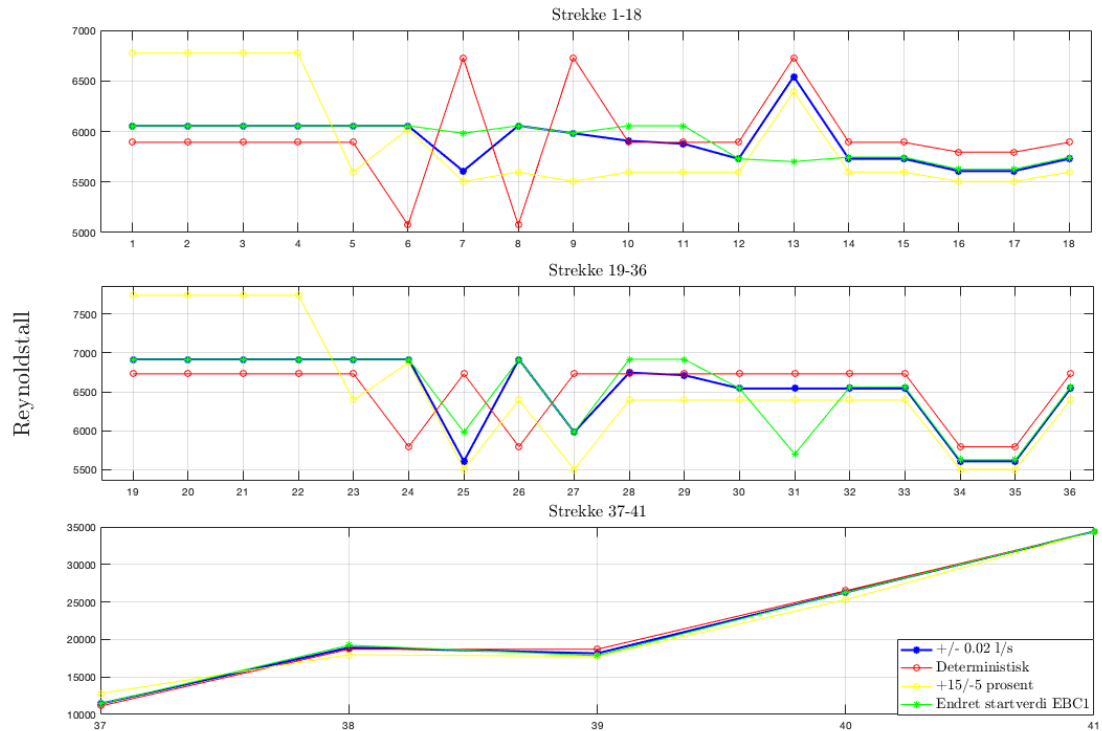


Figur 4.8: Optimale volumstrømmer for scenario 3

Felles for scenarioene 1 og 3 det er et skille ved samleikum C (brønn 12-18). Der går de optimale volumstrømmene fra å ligge på øvre tillatte verdi til nedre grenseverdi. Dette er samleikumen lengst ut i anlegget og er derfor ikke så overraskende. For scenario 2 er det derimot mindre forutsigbart hvor volumstrømmene legger seg innen referanseområdet for brønnene 1- 11. Scenario 2 gir også optimaliserte volumstrømmer ved nedre grenseverdi for samleikum C.

### 4.2.4 Reynoldstall

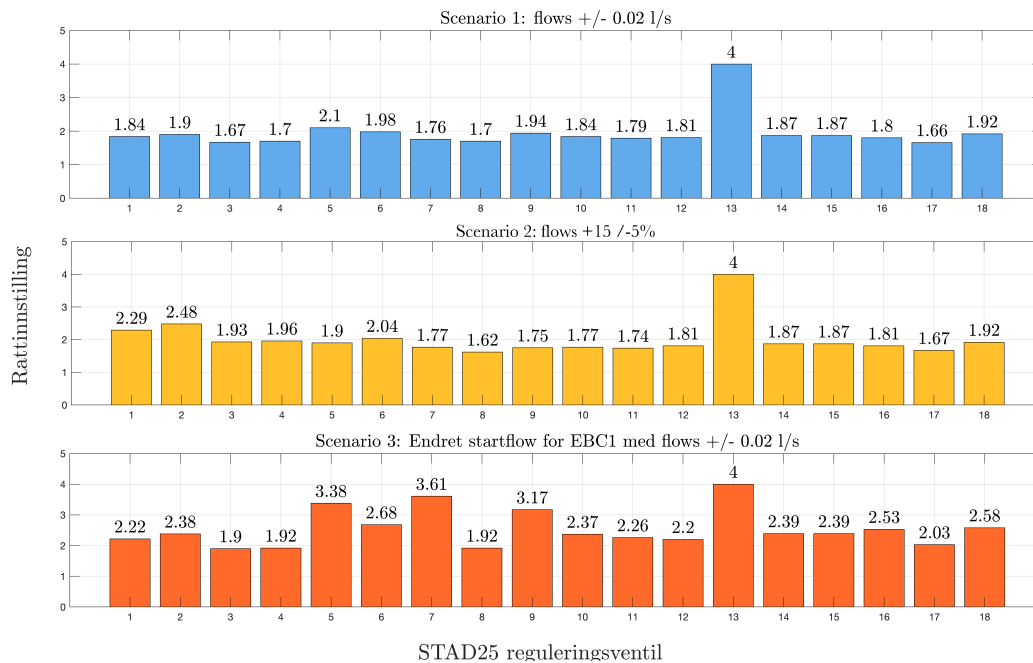
Reynoldstallene for samtlige 41 rørstrekk er fremstilt i 4.9. Det er kun krav om turbulent strømming i kollektorene grunnet varmeoverføring, som presisert i delkapittel 2.1.2. Colebrook ligningen, som har blitt benyttet, gjelder kun for turbulent strømming. Derfor er Reynoldstallene for samtlige rørstrekk undersøkt for å validere bruken av Colebrook ligningen. Resultatene er oppført som sammenhengende grafer for å danne et mer oversiktlig bilde av hvordan Reynoldstallene endres og for å skille scenarioene fra hverandre. Reynoldstallene er konstanter i hvert strekk da det er antatt uniform strømming. Alle de 41 strekkene i de fire scenarioene oppfylte kravet til turbulent strømming.



Figur 4.9: Reynoldstall for alle 41 strekk

### 4.2.5 Rattinnstilling og tilhørende Kv- verdier

I resultatene kan man lese ut hvilken reguleringsventil som er indeksventil. Indeksventilen er den ventilen med høyest trykkfall. For brønnparken ved OKS er dette reguleringsventilen ved borehull nummer 13 (ECB1). Dette er felles for alle scenarioene som har blitt undersøkt. Figur 4.10 viser en oversikt over rattinnstillingene for de 18 STAD 25 reguleringsventilene i energibrønnene.



Figur 4.10: Rattinnstillinger for de tre optimaliseringsscenarioene

Det fremkommer at Kv-verdiene og tilhørende rattinnstilling for scenario 1 og 2 følger hverandre jevnt for alle de 18 brønnene. For samleikum C er verdiene like eller tilnærmet like for alle brønnene. I scenario 3 med redusert start volumstrøm for den utslagsgivende brønnen (EBC1) kreves det jevnt over mindre struping i anlegget. Tabell 4.2 viser tilhørende rattinnstillinger til figur 4.10. Indeksventil er markert i rødt.



Ventil i brønn	Grenseverdi +/- 0.02 l/s	Grenseverdi +15%/-5%	Endret volumstrøm i EBC1 +/- 0.02 l/s
EBA1	3.15	4.56	4.34
EBA4	3.34	5.19	4.89
EBA6	2.69	3.44	3.33
RB2	2.74	3.53	3.41
EBB1	3.92	3.33	7.52
EBB2	3.59	3.77	5.76
EBB3	2.91	2.94	7.96
EBB4	2.73	2.50	3.40
EBB5	3.46	2.89	7.04
EBB6	3.15	2.94	4.85
EBB7	3.01	2.85	4.46
RB1	3.06	3.06	4.30
<b>EBC1</b>	<b>8.59</b>	<b>8.59</b>	<b>8.59</b>
EBC2	3.24	3.24	4.90
EBC3	3.24	3.24	4.90
EBC4	3.04	3.08	5.34
EBC5	2.63	2.65	3.74
EBC6	3.39	3.39	5.48

Tabell 4.2: Kv- verdier til optimaliseringsscenarioene

### 4.3 Energibesparelser og pumpekarakteristikk

Figur 4.11 viser pumpekarakteristikken for de tre optimaliseringsscenarioene. Pumpekarakteristikken er for  $\dot{V}_{total} = 12.56$  l/s med frysemediet HX35 ved temperatur  $3^{\circ}\text{C}$ . Pumpeeffekten kan beregnes med ligning 2.8, men er i dette tilfelle hentet fra teknisk datablad gitt av Wilo, gjengitt i vedlegg G. Pumpekarakteristikk er hentet ut for HX35 ved  $3^{\circ}\text{C}$ .

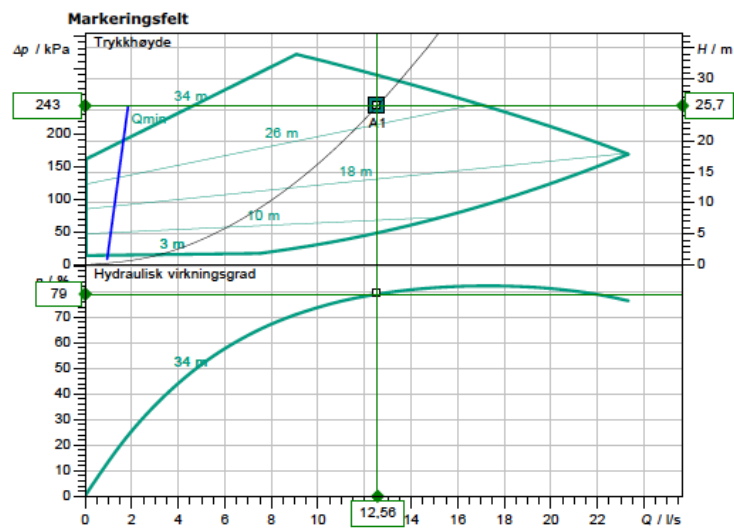
Antall timer hvor sirkulasjonspumpen går på maks er ukjent. For danne et bilde av besparelsene ble effektbehovet til pumpene multipliser med et antall timer som skal representere fyringssesongen. Dette gir energiforbruket til sirkulasjonspumpen. Definisjonen av en fyringssesong er hentet fra Novema [21] og er for Oslo fra 18.september til 8.mai. I timer utgjør det 5568. Resultatene er fremstilt i tabell 4.3.

Deterministisk	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
<b>Effektbehov [kW]</b>			
4.35	4.21	4.11	3.61
<b>Energibehov [kWh]</b>			
24221	23441	22884	20100
<b>Differanse [%]</b>			
-	3.2	5.5	17

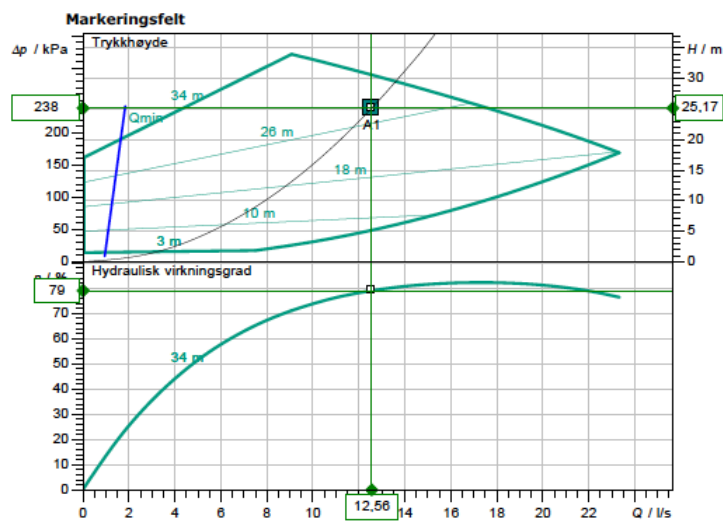
Tabell 4.3: Effekt- og energibehov til sirkulasjonspumpen

Det er viktig å opplyse at pumpekarakteristikk for deterministisk modell, scenario 1 og 2 omhandler samme type sirkulasjonspumpe som er installert ved OKS i dag, men med en kraftigere pumpemotor (5.3 kW). For scenario 3 er pumpekarakteristikken for dagens installerte pumpe med pumpeeffekt 4.1 kW. Begge er av typen Wilo Stratos GIGA 80/1-37. Det er to forskjellige pumper da pumpen med motoreffekt 4.1 kW ikke klarer trykktapene som fremkom i deterministisk resultat (251kPa), scenario 1 (243kPa) og 2 (238kPa). Maks trykkfall for sirkulasjonspumpen ved OKS med HX35 med  $T = 3^{\circ}\text{C}$  er  $\sim 230$  kPa, avlest av figur 4.11 c).

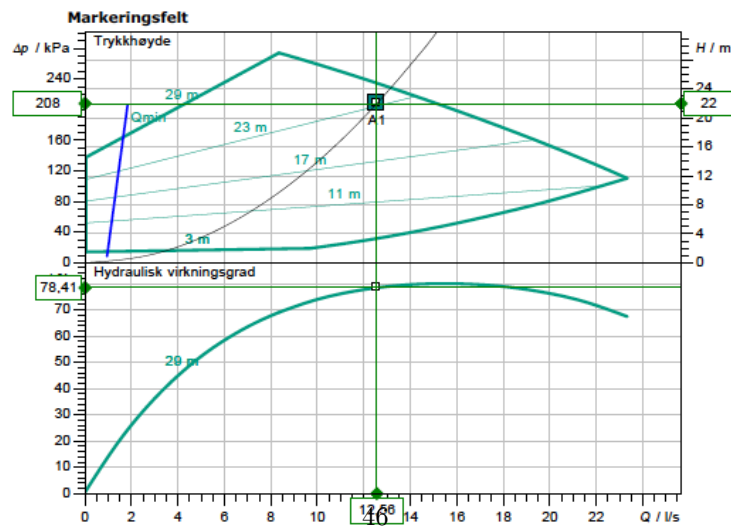
Energibruken til de to pumpene kan sammenlignes, tross ulik motorstørrelse, når den hydrauliske virkningsgrader er lik for begge pumpene på 79%. Fra ligning 2.8 ser en at den eneste varierende parameteren for scenarioene er trykkfallet  $\Delta P$ . Volumstrømmene er like.



(a) Dagens volumstrøm  $\pm 0.2$  l/s



(b) Dagens volumstrøm +15% / -5%



(c) Endring av EBC1 m/ dagens volumstrøm  $\pm 0.2$  l/s

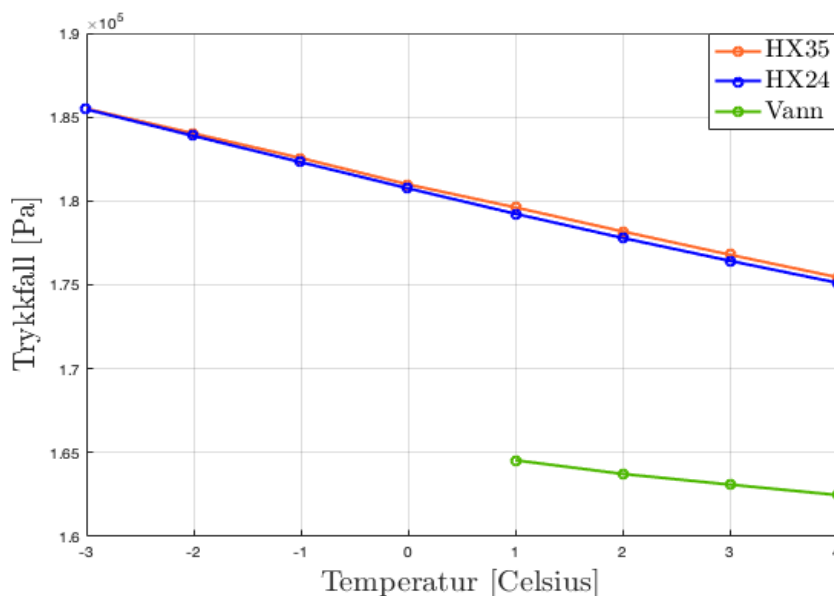
Figur 4.11: Pumpekaraktistikk for optimaliseringsscenarioene

## 4.4 Parameterstudie

Det ble utført en parameterstudie for å undersøke påvirkningen av rørenes ruhet, tettheten og viskositeten til arbeidsmediet. Målet var å undersøke hvordan nevnte faktorer påvirket trykkfallet. Parameterstudiet ble utført på optimaliseringsscriptet, men med låste verdier for volumstrømmer som tilsvarer dagens drift. Resultatene ble sammenlignet med trykkfallet funnet i deterministiske problemet. For at resultatene skulle være sammenlignbare og potensielt anvendbart i et anlegg ble kravet om turbulent strømming opprettholdt. Resultatene for Reynoldstall vil ikke bli presentert. Verdier for tetthet og kinematisk viskositet ble hentet fra mobilappen 'IMI HyTools'. Se vedlegg for E for inputverdier, og vedlegg F benyttet Matlab-script.

### 4.4.1 Temperatur

Resultatene for temperaturstudien er fremstilt i tabell 4.4 og figur 4.4. Felles for de tre mediene er at trykkfallet synker samtidig som temperaturen øker. HX24 (24 % bioetanol og 76 % vann) og HX35 følger hverandre tilnærmet lineært for hele det undersøkte temperaturområdet. Differansen er på det laveste kun 34 Pa ved  $-4$  °C. Den største forskjellen finner man ved temperatur  $2$  °C, men utgjør kun 389 Pa. Differansen mellom vann og frysemediene er derimot på omkring 15 000 Pa for alle temperaturene.



Figur 4.12: Resultater av parameterstudie for temperatur av arbeidsmediene HX24, HX35 og vann

Temperatur [°C]	TRYKKTAP							
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
HX24	185465	183878	182311	180754	179238	177797	176434	175127
HX35	185499	184027	182559	180986	179619	178186	176799	175460
Vann	-	-	-	-	164545	163731	163094	162477

Tabell 4.4: Påvirkning av temperatur for arbeidsmediene HX24, HX35 og vann

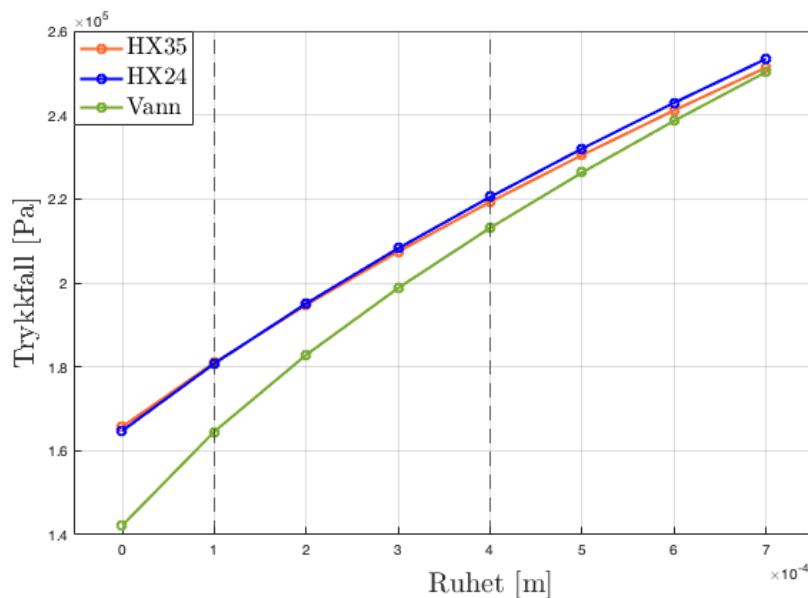
### 4.4.2 Ruhet

Figur 4.13 viser hvordan rørets ruhet påvirker trykkfallet. Resultatene er også fremstilt i tabell 4.5. Ruheten ble undersøkt ved temperatur  $0^{\circ}\text{C}$  for HX24 og HX35, og for  $1^{\circ}\text{C}$  for vann. Nevnte temperatur ble valgt for arbeidsmediene med bakgrunn i den deterministiske problemstillingen og er ment å gi et klarere sammenligningsgrunnlag.

For ruhet i PE- rør blir det i vanlig praksis brukt verdier på 0.1 - 0.4 mm [12]. Disse verdiene er derfor markert med stiplede vertikale linjer i figur 4.13. Ruheten lik 0.1 mm er benyttet for i deterministisk- og optimaliseringsscript. Her er det ingen forskjell i trykkfall for frysevæskene.

Ikke overraskende øker trykkfallet for samtlige medier når ruheten i røret øker. Når ruheten blir så høy som 0.6 - 0.7 mm utgjør det ikke lenger en vesentlig forskjell på hvilket arbeidsmedium man studerer og trykkfallet er omtrentlig det samme. I området med ruheten lik 0.4- 0.7 finner man materialer som tre [7], betongrør og nye støpejernsrør med betongforing [12]. Ruhetsverdier større enn 0.4 mm er ikke realistiske verdier for PE- rør.

Ruheten har størst innvirkning på trykkfallet med vann som arbeidsmediet med brattest stigingskurve. Vann gir også en trykktapsreduksjon på 16 500 Pa, tilsvarende 9%, ved ruhet lik 0.1 mm med temperatur  $1^{\circ}\text{C}$ .



Figur 4.13: Resultater for parameterstudie av ruhet for rørene

Ruhet [mm]	TRYKKTAP			
	0.01	0.02	0.03	0.04
HX24	180754	195094	208235	220465
HX35	180985	194754	207435	219281
Vann	164544	182851	198775	213107

Tabell 4.5: Trykkfall ved forskjellige ruhet på rørene for HX24, HX35 og vann

# Kapittel 5

## Diskusjon og konklusjon

Dette kapitlet omhandler oppgavens samfunnsmessige bidrag og faglige relevans. Både oppgavens faglige tyngde og forbedringsområder vil bli diskutert. Relevant er også en vurdering av resultatene og hvordan dette kan komme til nytte ved oppgradering av eksisterende- og utvikling av fremtidige bergvarmeanlegg.

### 5.1 Oppgavens bidrag

Oppgavens bidrag er flerdelt.

#### **Bedrifts- og samfunnsøkonomisk aspekt**

Optimaliseringsstudier kan potensielt bidra til besparelser. En mulig besparelse er at pumpen kan drives med en lavere belastning. Dette reduserer slitasje og forlenger pumpens levetid. Det reduserer også driftskostnadene for bergvarmeanlegget. Hvis optimaliseringsstudiet ikke gir noen større utslag på trykktapregnskapet gir det også en indikasjon på at anlegget driftes godt.

Hvis man ser på optimaliseringsscenarioer før innkjøp av pumpe, gir det et bedre vurderingsgrunnlag ved anleggsdimensjonering. Dersom trykkfallsbesparelsene er store, er det kanskje mulig å redusere pumpestørrelsen. Redusert pumpedrift er kostnadsbesparende fra dag en for byggeiere- og leietakere. Slik optimaliseringen har blitt gjennomført i denne oppgaven kreves det ingen ekstra komponenter, kun å regulere riktig, og kan derfor ansees som en kostnadseffektiv måte å oppnå besparelser.

#### **Miljømessig aspekt**

Oppgaven beskriver en måte å videreutvikle et bergvarmeanlegg ved å redusere belastningen på sirkulasjonspumpa. Dette gir både material- og driftsbesparelser. Studien beskriver også en måte å iverksette energieffektivisering ved å forestå etterundersøkelser etter igangsettelse av et anlegg. Oppgaven setter fokus på betydningen ved energioppfølging, som nevnt i NVE [22]. Ved å redusere pumpens energiforbruk gir det også avlastning av strømmettet. Det gjør tematikken relevant i en tid hvor strømrasjonering kan bli en realitet. Oppgaven viser fordelene av å benytte seg av bergvarme som et potensial for videreutvikling til en utslippsfri energiteknologi. Arbeidet kan også ansees som en påminnelse om at varme- og energisektoren alltid må etterstrebe å benytte ressursene tilgjengelig på best mulig måte.

#### **Videreutvikling av en kjent varmeteknologi**

Hovedobjektivet til oppgaven er å undersøke mulighetene for forbedring av det eksisterende anlegget ved OKS. Oppgaven kan også ansees som et bidrag i utviklingen av bergvarmeanlegg og utfordre etablerte ‘tommelfingerregler’ som ikke nødvendigvis er de mest gunstige reglene for å kunne minimere trykkfallet i et anlegg. Forhåpentlig kan oppgaven bidra med ideer til videreutvikling for aktører i bransjen. Gjennom oppgaven har det blitt utformet et script som kan videreutvikles og modereres til å kunne anvendes ved andre bergvarmeanlegg. Dette kan

gjøres ved å skreddersy scriptet til antall brønner og inndataparametere for rørlengder, diameter, bend og arbeidsmedium. Matlab-koden er utviklet som en åpen kildekode. Parameterstudie ga informasjon om hvordan arbeidsmediet og rørenes ruhet påvirker trykkfallet. Studien kan videreføres til andre anlegg eller videreutvikles, slik at en studie kan utføres før materialvalg blir gjort.

Gjennomføringen av masteroppgaven har gitt studenten relevant og nyttig informasjon om utnyttelsen av bergvarme og oppbygningen av bergvarmeanlegg med relevans for egen yrkespraksis innen fagfeltet energi og miljø i bygg.

## 5.2 Diskusjon

Fra litteraturstudiet fremkom det at optimalisering av et bergvarmesystem kunne ha flere definisjoner. For denne masteroppgaven innebærer begrepet optimalisering analyse av et parameter i et stort og intrikat system. Oppgaven startet som en case studie av bergvarmeanlegget ved OKS, men etter hvert som arbeidsprosessen utformet seg, ble det mer en teoretisk oppgave som bygde på forholdene ved OKS. De observerte resultatene må derfor vurderes som teoretisk trykkfall som ga optimale teoretiske verdier. For at resultatene skal kunne implementeres i bergvarmeanlegget ved OKS, krever det videre undersøkelser. Den deterministiske modellen ga et trykkfall som representerer dagens system ved OKS, under gitte forutsetninger. Koden ble utvidet der volumstrømmene ble etablert som variabler innen et gitt arbeidsområde. Tre scenarier ble utviklet med varierende arbeidsområde. Gjennom optimaliseringsfunksjonen 'fminimax' ble optimale volumstrømmer gitt, og besparelser funnet. Parameterstudiet bidro til å vise hvordan trykkfallet endrer seg ved ulike temperaturer. Dette viste et område hvor man kan forvente at det reelle trykktapet ligger.

### 5.2.1 Vurdering av volumstrømmer og trykktapsendringer

Undersøkelsen av anlegget ved OKS viser at optimaliseringen ikke gir de store trykktapsbesparelsene for scenario 1 og 2. Besparelsene ble betydelig større da det ble gjort endringer ved problembønnen EBC1. Som det fremkom ved scenario 3, ble det oppnådd en trykkfallsreduksjon på 23.3 % ved å frigjøre problembønnen fra dagens volumstrøm. Ved å foreta justeringer i enkeltbrønner, men ikke endre øvre og nedre grenseområde, utvider man ikke arbeidsområdet for volumstrømmene. Dette kan argumenteres som mindre inngripende endringer enn å tillate volumstrømmene med å øke 15%, som tillat i scenario 2.

Tabell 4.1 viser hvor volumstrømmene la seg innen det tillatte arbeidsområdet. Sammenlignes scenario 1 og 3 ser man at for de første ni til elleve brønnene ble optimal volumstrøm etablert ved øvre sjikt av tillatt arbeidsområde. Dette er ikke overraskende da arbeidsområdet for de to scenarioene er like. Endringen av strømningshastigheten i EBC1 gjorde først utslag ved samleikum C. Da grenseområdet ble utvidet i scenario 2 ble trykktapet redusert med 8.3%, men det viste at flow i 13 av 18 brønner la seg på nedre grenseverdi. Det kan være en indikasjon på at øvre grenseverdi er satt for høyt.

Felles for de tre scenarioene er at volumstrømmene la seg på øvre tillatte verdi for samleikum A. Grunnen til dette er at antall meter rørlengde er kortest ut til brønnene for denne samleikumen. Matlab tillater derfor en drift med høy  $\dot{V}$ . Felles var også at volumstrømmene lå på nedre eller tilnærmet lik nedre verdi for den ytterste samleikumen i systemet. Dette er som forventet da antall rørmeter er det høyeste her.

Det er sløyfe nummer 13 (EBC1) som bidrar med det desidert høyeste trykkfallet i anlegget. Ved å utvide det tillatte arbeidsområdet med  $\pm 0.02$  l/s (Scenario 1) ga det en trykkreduksjon på 4.75 %. Reduksjon var dog ikke tilstrekkelig stort til at trykkfallet kan håndteres ved dagens installerte sirkulasjonspumpe. Pumpekaraktistikken for dette scenarioet er derfor hentet for en Wilo Stratos GIGA med motor effekt på 5.3 kW. Scenario 1 ga et redusert energibehov på 3.2% av pumpeenergi.

I scenario 2 kan det diskuteres om det tillatte arbeidsområdet imøtekommer Prenøks anbefaling om 'tilnærmet like' volumstrømmer i en brønnpark. Scenario 2 ble utviklet etter samtaler med VVS-ingeniør M.E. Jacobsen som opplyste at definisjonen 'tilnærmet like' tilsvarer + 15% / -5% av regulert verdi. Denne tillatte 'feilmarginen' ble presentert som en bransjestandard. Ved dette scenarioet ble da øvre- og nedre grense på 0.828 l/s og 0.589 l/s. Det kan diskuteres om arbeidsområdet er noe stort. Dette scenarioet oversteg også arbeidsområdet til Stratos GIGA 4.1 kW, og besparelsene er derfor også beregnet for Stratos GIGA 5.1 kW. Besparelsene av pumpeenergi utgjorde 5.5%.

Scenario 3 ble utformet da brønn 13 (EBC1), ved gjentatte undersøkelser, gjennomgående var den brønnen med høyest trykkfall. Mulighetene for reduksjon av volumstrøm i denne brønnen ble da utforsket. Ved å redusere volumstrømmen i problembønnen EBC1 til 0.63 l/s var det mulig å redusere trykktapet fra 180 985 Pa til 138 745 Pa. Dette tilsvarer en reduksjon på 23.3 %. Hvis man legger til grunn at  $\Delta T = 3K$ , noe som oppgaven bygger på og anlegget ved OKS er regulert etter, skal ikke dette påvirke  $Q_{inn}$  og brønnene leverer like mye varme som de gjør per dags dato. Scenario 3 var også den eneste av de fire modellene som ga lavt nok trykktap til å kunne beholde dagens sirkulasjonspumpe. Det totale trykkfallet på 208.7 kPa (sum anlegg og fordamper) var også det eneste resultatet som var lavere enn trykkfallsverdien oppgitt i systemskjema fra OKS.

Ligning 2.8 gir at motorstørrelse ikke har innvirkning på pumpeeffekt. De avgjørende faktorene er trykktap og volumstrøm, da hydraulisk virkningsgrad er 79% for både 4.1 kW- og 5.3 kW pumpen. Energibehovene til de to pumpene kan sammenlignes da de bruker mye strøm ved drift. Forskjellen er kun at Wilo Stratos GIGA 5.1 kW har større motoreffekt. I anlegget på OKS er det installert en sirkulasjonspumpe av typen Wilo Stratos GIGA 80/1-37/4.1. Tallet 4.1 presenterer pumpens motoreffekt. Trykktapet funnet ved bruk av volumstrømmene fra innreguleringsprotokollen tilsa at trykktapet ved OKS tilsvarer 250.9 kPa. Dette overstiger hva sirkulasjonspumpen Wilo Stratos GIGA 80/1-37/4.1 klarer å håndtere ved  $\dot{V} = 12.56$  l/s og arbeidsmediet er HX35 ved 3°C. Ved avlesning fra figur 4.11, bilde c), ser man at maks pumpetrykk for nevnte modell og scenario er  $\sim 230$  kPa.

Hvis resultatene fra det deterministiske scriptet er realistisk vil det bety at pumpen ved OKS er underdimensjonert. Som det vil bli nevnt i dette kapitlet er det flere innvirkende faktorer som har blitt utelatt i beregningene, men ingen som er så signifikante at de alene eller i kombinasjon utgjør  $\sim 35$  kPa. Dette er differansen mellom dimensjonert trykkfall (216 kPa), funnet i vedlegg A, og deterministisk resultat. Siden differansen er så stor, anbefaler student at det foretas reelle trykktapsmålinger ved OKS. Kun scenario 3 resulterte i lav nok trykkfall til at sirkulasjonspumpen installert ved OKS håndterer det.

Pumpekaraktistikken er gitt for temperatur lik 3°C, trykkfallene er for temperatur 0°C. Denne differansen utgjør en begrensning i resultatenes nøyaktighet. Ved temperatur 3°C hadde trykket over pumpen vært lavere og med det også pumpeeffekten. Siden det er likt for alle scenarioer er også sammenligningsgrunnlaget likt.

Scenario 1 og 2 ga resultater som generelt krevde mye struping over de resterende 17 ventilene. Som vist i figur 4.3 a) og b) er trykktap grunnet friksjon mer varierende, men ligger likevel på et betraktelig lavere nivå enn for brønn 13. For scenario 3 var friksjonskomponenten den dominerende bidragsyteren og trykkfallet var jevnere. Dette resulterer i mindre generelt krav til struping. Dette kan også være en indikasjon på at man nærmer seg en optimal drift av anlegget.

Det ble observert at støttapets innvirkning økte da trykkfallet grunnet friksjon minket. Støttapet utgjorde 3.3 % i scenario 3 mot 2.5 % i deterministisk modell. Det fremkom at Reynoldstall ikke var en begrensning og kravet om turbulent strømming ble opprettholdt i alle scenarioene.

Ligning 2.11 viser sammenhengen mellom reduksjon av volumstrøm og reduksjon i trykkfall. En halvering av volumstrøm resulterer i  $\frac{1}{4}$  av den originale trykktapsverdien. Men mengde volumstrøm er også en faktor i mengden varme det er mulig å hente ut fra en energibrønn. Hvis den totale volumstrømmen i anlegget reduseres påvirker det varmen  $Q$  som avgis til fordamperen 2.1. En reduksjon av volumstrømmen kan resultere i at bergvarmeanlegget ikke møter OKS sitt



varmebehov. Dette er derfor ikke en anbefalt å måte og redusere trykktapet ved OKS.

Det utformede Matlab-scriptet har dannet grunnlaget for optimalisering og er gratis å benytte. Resultatene funnet kan benyttes ved OKS eller være starten på videre undersøkelser ved OKS. Oppgaven er relevant for eksisterende- og utvikling av fremtidige bergvarmeanlegg når det viser seg at optimalisering gjennom Matlab fungerer, og resulterer i reduserte anleggs- og driftskostnader.

### 5.2.2 Parameterstudie

Hensikten ved å utføre en parameterstudie er å bli kjent med hvordan arbeidsmediets egenskaper blir påvirket av temperatur og hvordan rørenes ruhet påvirker trykkfallet.

Parameterstudien viste at det er mulig å oppnå besparelser ved å endre arbeidsmediet fra HX35 til vann. Dette kan imidlertid ikke anbefales, da det innebærer en risiko for at vannet i rørene fryser og anlegget skades. Da vil kostnadene langt overstige det man potensielt kunne spart i redusert pumpedrift.

Det ble funnet at HX24 og HX35 ga tilnærmet like verdier, både for undersøkelsene av temperatur og av ruhet. Studenten ser derfor at det ikke er mulig å oppnå besparelser av betydning ved å endre frysevæske fra HX35 til HX24 i fremtiden hvis man kun ser på trykkfall som avgjørende faktor. HX24 har derimot noe høyere varmekapasitet enn HX35 ( $4004 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  mot  $3755 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ). Dette kan bidra til høyere varmeoverføring. HX24 er frostsikret til  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  [4] og kan derfor ansees som et sikkert arbeidsmedium for bruk i norsk klima og i norske grunnforhold. Muligheten for å bytte kan være et bidrag for å øke  $Q$ , da det viste av HX24 ikke økte trykkfall. Vann har igjen en høyere varmekapasitet ( $4200 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ) enn frysemediene, men som tidligere nevnt, faktoren veier ikke opp for risikoen for frostskafer.

Det å benytte seg av ruhet lik  $0.1 \text{ mm}$  ble bestemt gjennom samtale med ekstern veileder. Det er noe usikkerhet forbundet med valgte verdi, da det resultatet kan avvike fra det som fremkom gjennom studien av brønnparken ved OKS.

### 5.2.3 Usikkerhet knyttet til resultatene

Det er flere faktorer som kunne vært inkludert eller undersøkt nærmere, og som hadde bidratt til mer virkelighetsnære resultater. For eksempel har ikke turbokollektorrørenes innvirkning blitt vurdert. Produsent MoviTech opplyser at det er mulig å oppnå turbulent strømming ved lavere strømningshastighet grunnet rørenes innvendig rillede vegger. Ved å implementere dette åpner det for en ytterligere reduksjon av volumstrømmene, og med det også trykkfallene. Ruheten har derimot vært behandlet som konstant gjennom oppgaven.

Det ble bestemt å undersøke støttapets påvirkning først en tid ut i arbeidsprosessen. Støttap-skoeffisientene ble funnet ved manuell inspeksjon av figur B. Det resulterte at  $90^\circ$ - bendene ned til brønnene ble oversett. Matlab scriptet for anlegget er utformet under forutsetningen at systemet er symmetrisk for tur og retur. Trykktapet som oppstår ved innsnevring eller utvidelse av rørdiameter er derfor ikke inkludert. Heller ikke er trykktapet forårsaket av samlekummene eller stoppeventiler på retur i kollektorene blitt inkludert. Dette tilsier at  $\Delta P_{støttap}$  er høyere enn presentert i resultatene. Disse punktene blir derfor definert som en begrensning av nøyaktigheten til oppgaven.

Den største usikkerheten er at temperaturen ble ansett som uniform ved  $0^\circ\text{C}$  gjennom alle trykkfallsberegningene. Temperaturen på retur vil være høyere ( $1\text{--}4^\circ\text{C}$ ). Denne temperaturøkningen er ikke inkludert i Matlab-beregningene. De reelle trykkfallene er derfor lavere enn det som fremkom i alle scenarioene, da høyere temperatur gjør arbeidsmediet mindre viskøst. Dette reduserer friksjonen mellom fluidet og røret, og trykkfallet minker. Som det fremkom i parameterstudien minket trykkfallet ved økt temperatur. Det tilsier at trykkfallene er lavere ved faktisk drift enn hva som fremkom i oppgaven. Parameterstudien for temperatur kan benyttes som et utgangspunkt til å foreta et overslag. Ut ifra figur 4.12, kan en for temperaturområdet  $0\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

estimere at trykkfallet ligger i området 181- 175 kPa (+70 kPa grunnet fordampere). Det at pumpekarakteristikken er gitt for HX35 ved temperatur 3°C, og ikke 0°C, er også en punkt hvor sammenligningsgrunnlaget ikke overensstemmer.

### 5.3 Validering av metode

Til tross for at resultatene funnet for det deterministiske problemet ikke stemmer overens med data innhentet fra Nordisk Energikontroll, anseer studenten av metoden er validert. Det er det flere grunner til.

Studenten har ikke informasjon om hvordan trykkfallet i anlegget har blitt etablert. Det antas at det har blitt benyttet en 'bransjestandard'. Med det menes at det er tatt utgangspunkt i et standard trykk per meter, og denne verdien er multiplisert med antall meter rørlengde i anlegget. Dette er en praksis som har blitt etablert etter år med erfaringer, og bygger på teoretiske utregninger. Men det resulterer også i at man får tre forskjellige scenarioer. Den teoretiske verdien, verdien som bransjenormen gir og den faktiske verdien. Resultatene som fremkom i oppgaven OKS indikerer at det burde foretas videre trykkfallsundersøkelser. Ekstern veileder opplyste at total volumstrøm er basert på en verdi som oppfylte kravet om et temperaturløft på 3K i anlegget. Summen av total volumstrøm samstemmer ikke med summen av volumstrømmene i kollektorene. Strupeventilene er ikke regulert etter volumstrømmene oppgitt i innreguleringsprotokollen, men etter 'gitte verdier'. Korrekt innregulering er derfor ikke implementert.

Det deterministiske scriptet danner et sammenligningsgrunnlag. Optimalisering har fungert på den måten at det deterministiske trykkfallet har blitt optimalisert. Derfor er Matlab- koden validert til problemstillingen. Optimalisering har blitt oppnådd med de verdiene den har fått oppgitt. Da antall iterasjoner ble utvidet og trinnstørrelsen minsket og resultatene allikevel ikke forandret seg, gir det en indikasjon på at resultatene presentert som lokale minimumsverdier også kan ansees som de globale minimumsverdier for det optimaliserte trykkfallet. Det gjorde også at funksjon ikke ble hemmet av disse faktorene.

Ligningene benyttet i Acuña, J. [3] samstemmer med fremgangsmåten for trykktapsberegninger benyttet i denne masteroppgaven. Acuña, J. har foretatt teoretiske trykkfallsberegninger og sammenlignet disse med reelle trykkfallsmålinger.

### 5.4 Begrensninger

#### Trykktap i enkeltkomponenter

Trykkfallsberegningene baserer seg på at anlegget er symmetrisk tur/retur. Støttap som følge av innsnevring og utvidelse av rørdiameter er ikke inkludert. Trykkfallsverdiene for støttap antas derfor til å være noe høyere enn det som fremkommer i utregningene, men resultatene fra delkapittel 4.2.1 viser at støttapet utgjorde  $\sim 2.5\text{-}3.3\%$  av det totale trykktapet i anlegget.

Støttapet som resultat av rørdimensjonsendringer ansees som neglisjerbar, men burde også defineres som en begrensning når optimalisering har blitt utført på et forenklet versjon av anlegget. Da forgreningene i anlegget ble undersøkt ved å studere figur B ble det å inkludere 90°- bendene installert øverst i kollektorene utelatt. Det er heller ikke tatt høyde for trykktap grunnet strupe- og stengeventiler i de tre samlekkummene, eller for stengeventilen på tur i kollektorene. Det er også usikkerhet knyttet til verdiene av støttapskoeffisientene. Zijdemans oppgir at det er tilfeller hvor feilmargin kan være opp mot  $\pm 40\%$  [36]. Student oppfordrer at ved videre arbeid burde  $\zeta$ -verdiene hentes fra produsentenes datablad for mer kvalitetssikrede verdier.

**Mangelfull referansedata**

All informasjon om anlegget ved OKS er innhentet fra dokumentasjon gitt av underleverandørene, overlevert før igangsettelse september 2021. Det er en usikkerhet knyttet til verdiene implementert i oppgaven, da disse kan ha blitt endret i løpet av driftsperioden. Det foreligger ikke loggede verdier for volumstrøm og pumpetrykk. Sammenligningsgrunnlaget mellom beregnede verdier med faktiske verdier har vært begrenset. Blant annet var oppgitte volumstrømmer i innreguleringsprotokollen uoverensstemmende med volumstrømmen over sirkulasjonspumpen.

**Temperaturøkning i anlegget**

I Matlab er temperaturen til arbeidsmediet kodet til 0°C både for tur og retur. Dette er ansett som den største usikkerheten i de beregnede trykkfallsresultatene. Parameterstudie viser at trykkfallet synker med økende temperatur.

**Driftscenario**

Analysen av bergvarmeanlegget er begrenset til scenario ved maks varmebehov.

**Masteroppgavens omfang**

Masteroppgavens tids- og størrelsesbegrensning ga en avgrensning på antall optimaliseringsscenarioer som ble undersøkt.

## 5.5 Konklusjon

Da resultatene var så avvikende fra oppgitt totaltrykkfall (216 kPa), er det vanskelig å gi en klar konklusjon. Scenario 2 var det scenariet som nærmest fulgte SNLs definisjon av optimalisering mest presist (presentert i delkapittel 2.2). Videre kan det også diskuteres at scenario 2 hadde et arbeidsområde som var for stort og derfor ikke er optimalt for systemet som ble undersøkt. Scenario 1 oppfyller alle krav til gyldig arbeidsråde og SNLs definisjon av optimalisering. Dette var dog det scenariet med lavest trykktapsreduksjon og pumpebesparelser. Betingelsene for optimalisering ble endret ved å forandre den ene startvolumstrømmen i scenario 3. Hvis en skal trekke en konklusjon kun basert tall og besparelser, er scenario 3 det scenariet som gir optimale driftsforutsetninger for bergvarmeanlegget ved Oslo Kristne Senter.

## 5.6 Videre arbeid

Gjennom arbeidet av masteroppgaven oppdager man hvor mange vinklinger det er mulig å ha og parametere som potensielt kunne vært studert. Masteroppgaven har dog en tids- og størrelsesbegrensning, som setter en naturlig begrensning av omfanget. Denne masteroppgaven viser, under gitte forutsetninger, at Matlab med Optimization toolbox gjør det mulig å finne optimale volumstrømmer i kollektorene i anlegget. Det er gjort forenklinger og antagelser for anlegget som gjør at oppgaven har et utviklingspotensial. Videre arbeid vurdert som relevante for fagområdet energi og miljø i bygg er presentert punktvis videre.

- Studenten forslår å implementere  $\Delta T$  i scriptene og undersøke hvordan temperaturen på arbeidsvæsken påvirker trykket i systemet. Per i dag er scriptet kodet for at væsken holder en konstant temperatur som gir en usikkerhet til hvor realistiske resultatene er.
- Matlab- koden har blitt spesifikt utformet for brønnparken ved OKS. Videre arbeid kan være å omformulere koden til en mer generell kode, slik at den kan anvendes til andre parallellkoblede anlegg.
- Denne studien er knyttet opp mot et eksisterende, men beregningene er teoretiske og baserer seg på verdier oppgitt i innreguleringsprotokoll. For å kunne konkretisere resultatene kreves det målinger som gir dagens verdier eller gir en bekreftelse på at anlegget driftes ved oppgitte verdier.
- Videre undersøkelser av temperaturen i fjellet og varmeoverføringsevne slik at man får riktig input verdier av tetthet og viskositet
- Sammenligne besparelser ved pumpedrift gitt en reduksjon av volumstrøm i problembønn ECB1 og COP'en til varmpumpene. Går besparelsene fra pumpedrift opp i opp med økte energibruk ( $W_{inn}$ ) til varmpumpen for å oppnå samme COP?
- Videre undersøkelser med forskjellige øvre- og nedre grenseområder. Hvordan hadde volumstrømmene og det tilhørende trykktapet endret seg hvis man frigjorde seg fra dagens startverdier og tillot alle volumstrømmene å variere fritt mellom 0.74- 0.60 l/s? Dette foreslås med forbehold om at kravet for turbulent strømming opprettholdes.
- Videre testing av inngangsverdier for å se hvilke parametere som kan bidra til å redusert trykkfall.
- Hvis man legger til grunn at  $Q = 28 \text{ W/m}$ , beregnet ved ligning 2.1, kan denne verdien benyttes til å finne  $\Delta T$  mellom inn- og utløp for hver kollektor. Dette kan gjøres ved en omskriving av ligning 2.1 slik at den får formen

$$\Delta T = \frac{28 \text{ W/m} * \text{Borehullsdypde}}{\dot{V} * C_p}. \quad (5.1)$$

Dette kan implementeres i Matlab ved en 'for'- løkke. Slik kan temperaturbidraget fra hver enkelt brønn etableres og følgelig gir en mer detaljert oversikt over bidraget fra de forskjellige brønnene. Ligning 2.1 kan også benyttes til å studere hvor mye effekt hver brønn må levere hvis man setter  $\Delta = 3 \text{ K}$  som et krav. Dette kan videre påvirke  $\dot{V}_{total}$ .

# Bibliografi

- [1] 451.021. Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring. Byggforskserien, Sintef Byggforsk, november 2018.
- [2] Jonassen Ø Kaasa L. Knudsmoen H. Velure M. Aarbø, T.K. Grunnvarmebasert oppvarming av bolighus. Technical report, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, 2002. URL [http://www.ivt.ntnu.no/docs/igb/2002\\_gr4\\_grunnvarmebasert\\_oppvarming\\_av\\_bolighus.pdf](http://www.ivt.ntnu.no/docs/igb/2002_gr4_grunnvarmebasert_oppvarming_av_bolighus.pdf).
- [3] J. Acuña. Improvements of u-pipe borehole heat exchangers. licentiate thesis. *KTH- School of Industrial Engineering and Management*, 2010.
- [4] Båsum Boring AS. En miljøvennlig etanolbasert kuldebærer for varmepumper. URL [https://basum.no/wp-content/uploads/HX\\_brosjyreark-1.pdf](https://basum.no/wp-content/uploads/HX_brosjyreark-1.pdf).
- [5] F. Bockelmann and M. N. Fisch. It works—long-term performance measurement and optimization of six ground source heat pump systems in germany. *Energies*, 12(24):4691, 2019.
- [6] Ghajar A.J. Cengel, Y.A. *Heat and Mass Transfer*. McGraw- Hill Education, 2015.
- [7] J.M. Cengel, Y.A. og Cimbala. *Fluid Mechanics*. McGraw- Hill Education, 2018.
- [8] T. Dagsavisen ved Sandberg. Nå vil flere bore for billigere energi, 2021. URL <https://www.dagsavisen.no/nyheter/innenriks/2021/12/18/na-vil-flere-bore-for-billigere-energi/>.
- [9] Azzolin M. Benassi G. Del Col, D. and M. Mantovan. Experimental analysis of optimal operation mode of a ground source heat pump system. *Energy Procedia*, 45:1354–1363, 2014.
- [10] K. Ebnes and E. Hagen. Driftsvurdering av kalnes energisentral. Master’s thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås, 2017.
- [11] Nordisk Energikontroll. Bergvarme på oslo kristne senter, 2021. URL <https://noen.no/aktuelt/bergvarme-p%C3%A5-oslo-kristne-senter->.
- [12] EPANET. Ruhetsverdier, 2020. URL <https://epanet.no/kom-i-gang/praksis/ruhetsverdier/>.
- [13] Ø. Grøn. Store norske leksikon: Optimalisere, 2018. URL <https://snl.no/optimalisere>.
- [14] *Lær MATLAB trinn for trinn*. Haugen, F., 2004. URL [http://techttech.no/publications/matlab/forord\\_utgave2.pdf](http://techttech.no/publications/matlab/forord_utgave2.pdf).
- [15] L.E. Helseth. Store norske leksikon: Viskositet, 2021. URL <https://snl.no/viskositet>.
- [16] K. Hofstad. Store norske leksikon: Tetthet, 2022. URL <https://snl.no/tetthet>.
- [17] *Optimization Toolbox- User’s Guide*. The MatWorks, 2005. URL [https://folk.ntnu.no/thz/matlab\\_doc/optim\\_tb](https://folk.ntnu.no/thz/matlab_doc/optim_tb).
- [18] MuoviTech. Turbo- effekten, 2022. URL <https://www.muovitech.com/NO/?>

- [19] Nemitek. Kompetansebiblioteket, 2022. URL <http://kompetansebiblioteket.no/>.
- [20] E. Nordgård-Hansen, N. Kishor, K. Midttømme, V. Risinggård Kjær, and J. Kocbach. Case study on optimal design and operation of detached house energy system: Solar, battery, and ground source heat pump. *Applied Energy*, 308:118370, 2022.
- [21] Novema. System dimensjonering. URL [http://novemakulde.no/01%5Cdot03\\_09.pdf](http://novemakulde.no/01%5Cdot03_09.pdf).
- [22] NVE. Energieffektivisering, 2022. URL <https://www.nve.no/energi/energisystem/energibruk-effektivisering-og-teknologier/energieffektivisering/>.
- [23] U. Prestegaard. Lading og lagring av varme i energibrønner for bygningsoppvarming. Master's thesis, NTNU - Institutt for energi-og prosesssteknikk, 2014.
- [24] Prosjektering av energianlegg. Energibrønner i fjell. Prenøk, Prenøk, 2011.
- [25] Prosjektering av energianlegg. Sirkulasjonspumper i varme- og kjøleanlegg. Prenøk, Prenøk, 2014.
- [26] Andersson S. Östin R. Olofsson T. Puttige, A. R. Modeling and optimization of hybrid ground source heat pump with district heating and cooling. *Energy and Buildings*, 264:112065, 2022.
- [27] L.I. Stensaas. *Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer*. Skarland press AS, 1996.
- [28] J. Strålberg and S. Hartvigsen. Geologiske forutsetninger for uttak av grunnvarme i trondheimsområdet-varmeledningsevne og varmeproduksjon. Master's thesis, NTNU, 2022.
- [29] J. Torgersen. Analyse av energibrnn for oppvarming av kontorbygg. Master's thesis, OsloMet- Storbyuniversitetet, 2019.
- [30] Ukjent. Store norske leksikon: Glimmerskifer, 2022. URL <https://snl.no/glimmerskifer>.
- [31] Norges Geologiske Undersøkelse. Grunnvarme, 2020. URL <https://www.ngu.no/emne/grunnvarme>.
- [32] Norges Geologiske Undersøkelse. Arealinformasjon- norge og svalbard m/ havområder, 2021. URL [https://geo.ngu.no/kart/arealis\\_mobil/?lang=Norsk&Box=-801707:6300000:1621707:9000000&map=Norges.vassdrags..og.energidirektorat:.Kvikkleire...faresonekart](https://geo.ngu.no/kart/arealis_mobil/?lang=Norsk&Box=-801707:6300000:1621707:9000000&map=Norges.vassdrags..og.energidirektorat:.Kvikkleire...faresonekart).
- [33] Norges Geologiske Undersøkelse. Brønnparker, 2021. URL <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/energibronn/bronneparker>.
- [34] Norges Geologiske Undersøkelse. Lukkede systemer, 2021. URL <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/energibronn/lukkede%20systemer>.
- [35] WILO. Stratos giga 80/1-32/4,1-r1, 2022. URL <https://wilo.com/no/no/Produkter-og-applikasjoner/no/produkter-og-ekspertise/forretningsbygninger/kjoeleteknikk-og-klima/wilo-stratos-giga/stratos-giga-80-1-32-4-1>.
- [36] D. Zijdemans. *Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer*. Skarland press AS, 2018.

# Vedlegg









# Tillegg C

## Matlab- script: Deterministisk problem

### ALLOKERING

```
FS=zeros(41,18); % Flow struktur
F=zeros(41,1); % Flow i de ulike rørlengder
V=zeros(41,1); % Hastighet i de ulike rørlengde
FC=zeros(18,1); % Flow i de ulike kollektorer (justerbare i optimalisering)
PS=zeros(18,41); % Total trykkfallbidrag for den enkelte streng.
dP=zeros(41,1); % Trykkfall i de ulike rørledninger
Ptotal=zeros(18,1); % Trykkfall for den enkelte streng
Pv=zeros(18,1); % Trykkfall over strupeventiler
Kv=zeros(18,1); % Kv verdier for strupeventiler
Ratt=zeros(18,1); % Rattinnstilling for strupeventil
D=zeros(41,1); % Diameter for de ulike ledninger
L=zeros(41,1); % Lengde for de ulike ledninger
Re=zeros(41,1); % Reynoldstall for de ulike rørledninger
Kvmax= 8.59;
```

### DIAMETER OG RØRLENGDER

```
D(:)=[45 45 45 45 45 45 40 45 40 45 45 45 40 45 45 40 40 45 ...
      40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 90 90 90 125 125]; % Diameter
D= D-2*2.4; % Korigerer for veggtykkelse
D= D/1000; % Diameter i meter

L(:)=[310 310 180 200 310 310 250 190 250 310 293 265 250 310 310 247 200 310 ...
      2 15 25 20 35 20 15 15 10 5 5 20 20 10 10 5 10 20 10 1 48 40 9]; % Lengder
```

### DAGEN VOLUMSTRØMMER I KOLLEKTORENE

```
FC(:)=[.72 .72 .72 .72 .72 .62 .72 .62 .72 .72 .72 .72 .72 .72 .62 .62 .72]; % [l/s]
```

### BRINE HX35, TETTHET, RUHET OG VISKOSITET

```
tetthet=953; % Tetthet HX35 [kg/m3]
kinvi=3.87E-6; % [m2/s]
Dmy=kinvi*tetthet; % Dynamisk viskositet brine [kg/ms]
Ru=1E-4; % Ruhet PE rør.
```

### VOLUMSTRØM MATRISE

```
for i=1:18
    FS(i,i)=1;
    FS(i+18,i)=1;
end

FS(37,:)= [1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; % TIL SAMLEKUM A
FS(38,:)= [0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0]; % TIL SAMLEKUM B
FS(39,:)= [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1]; % TIL SAMLEKUM C
FS(40,:)= [0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
FS(41,:)= [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];

F=FS*FC; % Gir flow fordeling for de ulike rørledninger. 1 til 41
```

### ENDRING AV BENEVNING (FLOW OG KOLLEKTORFLOW)

```
F=F/1000; % Flow fra l/s til m3/s
FC=FC/1000; % Kollektorflow fra l/s til m3/s
```

## REYNOLDSTALL

```
for i=1:1:41
    V(i)=F(i)/(pi*(D(i)/2)^2); % Hastighet for den enkelte rørlengde
    Re(i)=tetthet*V(i)*D(i)/Dmy; % Reynoldstall
end

Min_Reynoldstall=min(Re(1:18)) % Laveste Reynoldstallet i kollektorene
```

## TRYKKFALLET OVER EN ÅPEN STAD25 VENTIL UTGJØR

```
Pvinit=1000*(36*FC.*1000./Kvmax).^2;
% OMSKRIVING AV LIGNING: Kv(i)=36*FC(i)*1000/sqrt(Pv(i)/1000)
```

## TRYKKFALL I DE ULIKE RØRSTREKKENE

```
for i=1:41
    dP(i)=2*L(i)*trykk_pr_meter(D(i),Ru,V(i),tetthet,Re(i));
end
```

## TRYKKFALL I DE ULIKE RØRSTREKKENE

```
for i=1:41
    dP(i)=2*L(i)*trykk_pr_meter(D(i),Ru,V(i),tetthet,Re(i));
end
```

## TILLEGGER TRYKKFALLET AV ÅPNE STAD 25- REGULERINGSVENTILER

```
for i=1:18
    dP(i)= dP(i)+1000*(36*FC(i)*1000./Kvmax)^2;
end
```

## STØTTAP

```
%TRYKKTAPSKOEFFISIENTER

g_45= 0.4; % 45 GRADER BEND
g_90 = 0.3; % 90 GRADER BEND
g_180 = 0.2; % 180 GRADER BEND
tbend = 1.0; % TBEND FORGRENING
tbend_rett= 0.2; % TBEND RETT

S= [g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180...
    g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_45 (g_45+ g_45+g_45)...
    (g_45+ g_45) g_90 g_45 g_45 (g_45+g_90) (g_45+g_90) g_45 g_90 g_45...
    (g_90+g_90) g_90 (g_90+ g_45) (g_90+ g_45) g_90 g_90 g_90...
    (g_90 +tbend) tbend g_90 (g_90+g_45+tbend_rett) (g_90+tbend)];

for i=1:41
    Stot(i)=S(i)*(tetthet*V(i)^2)/2; % [Pa]
end

Stot= Stot';
```



#### TOTALTRYKKFALL

```
%Trykkfallet i hver streng er nå:  
Trykkfall=(Ptotal+Pdev)'  
  
% I tillegg kommer da trykkfall i varmeveksler varmepumpe som er ca 70 000 Pa
```

#### KV- VERDIER

```
for i=1:18  
    Kv(i)=36*FC(i)*1000/sqrt(Pv(i)/1000);  
end
```

#### RATTINSTILLINGER STAD 25

```
y=[0.599 1.03 2.13 3.64 5.26 6.65 7.79 8.59]; %Tabellverdier for STAD 25  
v=[0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4];  
  
for i=1:18  
    Ratt(i) = interp1(y,v,Kv(i),'linear');  
end  
  
Rattinnstilling=Ratt'
```

#### BEREGNING AV TRYKK PR METER RØR

```
function [P]=trykk_pr_meter(diameter, ruhet,v,tetthet,Re)
```

```
fun = @(x) (-2*log10(2.51/(Re*x^0.5)+(ruhet/diameter)/3.72))-1/(x^0.5);  
x0=0.1; % Startverdi for iterasjon  
lamda=fzero(fun,x0);  
P=lamda*(1/diameter)*(tetthet*(v^2)/2); % Friksjonsfaktor f  
end
```

Figur C.1: Matlab- script for deterministisk problemstilling



# Tillegg D

## Matlab- script: Optimalisering

### OPTIMALISERING

```
FC=zeros(18,1);

FC(:)=[.72 .72 .72 .72 .72 .72 .62 .72 .62 .72 .72 .72 .72 .72 .62 .62 .72]; % l/s
FC=FC/1000 % l/s --> m3/s

Kvmax= 8.59;

%%% OPTIMALISERING %%%

% ØVRE OG NEDRE GRENSE V/ SCENARIO 1 OG 3
x0=FC;
lb=FC- 0.02/1000;
ub=FC+ 0.02/1000;

% ØVRE OG NEDRE GRENSE V/ SCENARIO 2
% x0=FC;
% lb=FC-(0.05)*FC;
% ub=FC+(0.15)*FC;

A=[];
b=[];

Aeq=ones(1,18);
beq=12.56/1000;
options=optimoptions(@fminimax,'MaxIter',10000, 'StepTolerance', 1.0e-09)

% max(P0val) skal minimaliseres
% x er optimale volumstrømmer
[x,P0val]=fminimax(@myfun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

[P0, Re, PS, dP, F, Kv, V, Stot, P0minor, P0major, min_Re] = myfun(x)

% Dette er nødvendig trykkfall for å tilfredsstille nødvendig flow i streng med høyest trykkfall
[pm,ind]=max(P0);

Nodvendig_trykk_eks_VPveksler_og_preset_strupeventil_Pa=pm;

Pvinit=1000*(36*x.*1000./Kvmax).^2; % Trykktapet en åpen STAD25 ventil gir

Pdev= pm- P0; % Struping

Pv=Pdev+Pvinit; % Beregning av trykkfall over strupeventil
```



## TOTALT TRYKKFALL

```
% Trykkfallet i hver streng:  
Trykkfall=(P0+Pdev)';  
  
% I tillegg kommer trykkfall i varmeveksler: ca 70 000 Pa
```

## KV- VERDIER

```
for i=1:18  
    Kv(i)=36*x(i)*1000/sqrt(Pv(i)/1000);  
end
```

## RATTINNSTILLINGER STAD25

```
y=[0.599 1.03 2.13 3.64 5.26 6.65 7.79 8.59]; % Tabellverdier for STAD 25  
v=[0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4];  
  
for i=1:18  
    Ratt(i) = interp1(y,v,Kv(i),'linear');  
end  
  
Rattinnstilling=Ratt';
```

## TEORI OG SUBROUTINER

### BEREGNING AV OBJEKTFUNKSJON

```
function [P0, Re, PS, dP, F, Kvmax, V, Stot, P0minor, P0major, Min_Re]=myfun(x)  
  
% Allokering %  
FS=zeros(41,18); % Flow struktur  
F=zeros(41,1); % Flow i de ulike ledninger  
V=zeros(41,1); % Hastighet i de ulike rørlengde  
PS=zeros(18,41); % Total trykkfallbidrag for den enkelte streng.  
dP=zeros(41,1); % Trykkfall i de ulike ledninger  
Re=zeros(41,1); % Reynoldstall for de ulike segmenter  
Kvmax= 8.59;
```

### DIAMETER OG RØRLENGDER

```
D(:)=[45 45 45 45 45 45 40 45 40 45 45 45 40 45 45 40 40 45...  
    40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 90 90 90 125 125]; % Diameter  
D=D-2*2.4; % Korrigerer for veggtykkelse  
D=D/1000; % Diameter i meter  
  
L(:)=[310 310 180 200 310 310 250 190 250 310 293 265 250 310 310 247 200 310...  
    2 15 25 20 35 20 15 15 10 5 5 20 20 10 10 5 10 20 10 1 48 40 9]; % Lengder
```

### BRINE HX35, TETHET, KINETISK VISKOSITET OG RUHET

```
tetthet=953; % Tetthet brine [kg/m3]  
kinvi=3.87E-6; % [m2/s]  
Dmy=kinvi*tetthet; % Dynamisk viskositet brine [kg/ m s]  
Ru=1E-4; % Ruhet PE rør
```

### VOLUMSTRØM FORDELINGS MATRISE

```
for i=1:18  
    FS(i,i)=1;  
    FS(i+18,i)=1;  
end  
  
FS(37,:)= [1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; % Samlekum A  
FS(38,:)= [0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0]; % Samlekum B  
FS(39,:)= [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1]; % Samlekum C  
FS(40,:)= [0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];  
FS(41,:)= [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];  
  
F=FS*x; % Gir flow fordeling for de ulike segmenter. 1 til 41
```

## VOLUMSTRØM OG REYNOLDSTALL

```
for i=1:1:41
    V(i)=F(i)/(pi*(D(i)/2)^2); % Hastighet for den enkelte rør lengde
    Re(i)=tetthet*v(i)*D(i)/Dmy; % Reynoldstall
end
Min_Re=min(Re(1:18)); % Laveste Reynoldstallet i kollektorene
```

## TRYKKFALL I DE ULIKE RØRSTREKKENE

```
for i=1:41
    dP(i)=2*L(i)*trykk_pr_meter(D(i),Ru,V(i),tetthet,Re(i));
end
```

## TILLEGGER TRYKKFALLET AV ÅPNE STAD 25- REGULERINGSVENTILER

```
for i=1:18
    dP(i)= dP(i)+1000*(36*x(i)*1000/Kvmax)^2;
end
```

## STØTTAP

```
%TRYKKTAPSKOEFFISIENTER
g_45= 0.4; % 45 grader bend
g_90 = 0.3; % 90 grader bend
g_180 = 0.2; % 180 grader bend
tbend = 1.0; % T bend forgreining
tbend_rett= 0.2; % T bend rett

S= [g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 ...
    g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_180 g_45 (g_45+ g_45+g_45)...
    (g_45+ g_45) g_90 g_45 g_45 (g_45+g_90) (g_45+g_90) g_45 g_90 g_45...
    (g_90+g_90) g_90 (g_90+ g_45) (g_90+ g_45) g_90 g_90 g_90...
    (g_90 +tbend) tbend g_90 (g_90+g_45+tbend_rett) (g_90+tbend)];

for i=1:41
    Stot(i)=S(i)*(tetthet*v(i)^2)/2; %[Pa]
end
Stot=Stot';
```



# Tillegg E

## Input parameterstudie

Temperatur [ $^{\circ}C$ ]	Tetthet [ $kg/m^3$ ]	Kinematisk viskositet [ $m^2/s$ ]
1	999.9	$1.712 \times 10^{-6}$
2	999.9	$1.654 \times 10^{-6}$
3	1000	$1.608 \times 10^{-6}$
4	1000	$1.565 \times 10^{-6}$

Tabell E.1: Inputverdier for vann som arbeidsmedie

Temperatur [ $^{\circ}C$ ]	Tetthet [ $kg/m^3$ ]	Kinematisk viskositet [ $m^2/s$ ]
-3	968.6	$4.047 \times 10^{-6}$
-2	968.3	$3.884 \times 10^{-6}$
-1	968.0	$3.726 \times 10^{-6}$
0	967.7	$3.572 \times 10^{-6}$
1	967.4	$3.425 \times 10^{-6}$
2	967.1	$3.288 \times 10^{-6}$
3	966.8	$3.161 \times 10^{-6}$
4	966.4	$3.043 \times 10^{-6}$

Tabell E.2: Inputverdier for HX24 som arbeidsmedie

Temperatur [ $^{\circ}C$ ]	Tetthet [ $kg/m^3$ ]	Kinematisk viskositet [ $m^2/s$ ]
-3	954.8	$4.329 \times 10^{-6}$
-2	954.3	$4.175 \times 10^{-6}$
-1	953.8	$4.024 \times 10^{-6}$
0	953.4	$3.874 \times 10^{-6}$
1	952.9	$3.727 \times 10^{-6}$
2	952.4	$3.587 \times 10^{-6}$
3	951.9	$3.454 \times 10^{-6}$
4	951.4	$3.328 \times 10^{-6}$

Tabell E.3: Inputverdier for HX35 som arbeidsmedie

## Tillegg F

# Matlab- script: Parameterstudie

```
function resultater = OKS_optimal_parameterstudie( varargin )
```

```
% definerer mulige inputs
defaultRu = 1e-4;
defaultT = 0;
defaultBrine = 'HX35'; validBrine = {'water','HX24','HX35'};...
checkBrine = @(x) any(validatestring(x,validBrine));

% oppretter et parser objekt, og legger til parametere
% og deres spesifiserte verdi (via varargin) til objektet
p = inputParser; % danner et 'parser objekt'
addParameter(p, 'Ru', defaultRu, @isnumeric)
addParameter(p, 'T', defaultT, @isnumeric)
addOptional(p, 'Brine', defaultBrine, checkBrine)
p.KeepUnmatched = true;
parse(p, varargin{:})

disp('Parameter values are:')
disp(['Brine: ', p.Results.Brine])
disp(['Ru: ', num2str(p.Results.Ru)])

global Ru T brineType
Ru = p.Results.Ru;
T = p.Results.T;
brineType = p.Results.Brine;
```

```
FC=zeros(18,1);
FC(:)=[.72 .72 .72 .72 .72 .62 .72 .62 .72 .72 .72 .72 .72 .62 .62 .72];%L/s
FC=FC/1000; % [m3/s]

Kvmax=8.59;

x0=FC;

lb=FC;
ub=FC;

A=[];
b=[];

Aeq=ones(1,18);
beq=12.56/1000;
```





```

elseif strcmp(brineType, 'HX24')
    T_data = [-3 -2 -1 0 1 2 3 4];
    tetthet_data = [968.6 968.3 968 967.7 967.4 967.1 966.8 966.4];
    Kmy_data = [4.047e-6 3.884e-6 3.726e-6 3.572e-6 3.425e-6 3.288e-6 3.161e-6 3.043e-6]

    tetthet = interp1(T_data,tetthet_data,T);
    Kmy = interp1(T_data,Kmy_data,T);

    Dmy = tetthet * Kmy;

elseif strcmp(brineType, 'HX35')
    T_data = [-3 -2 -1 0 1 2 3 4];
    tetthet_data = [954.8 954.3 953.8 953 952.9 952.4 951.9 951.4];
    Kmy_data = [4.329e-6 4.175e-6 4.024e-6 3.87e-6 3.727e-6 3.587e-6 3.454e-6 3.328e-6];

    tetthet = interp1(T_data,tetthet_data,T);
    Kmy = interp1(T_data,Kmy_data,T);

    Dmy = tetthet * Kmy;

end

end

end

end

```

Figur F.1: Matlab- script: Funksjonen til parameterstudie

```

myRuCases = [0 0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 0.0005 0.0006 0.0007]; %meter

for i = 1:length(myRuCases)
    res_HX35{i} = OKS_optimal_parameterstudie( 'Ru', myRuCases(i), 'Brine', 'HX35', 'T', 0);
    trykkfall_HX35(i) = res_HX35{i}.Trykkfall(1);

    res_HX24{i} = OKS_optimal_parameterstudie( 'Ru', myRuCases(i), 'Brine', 'HX24', 'T', 0);
    trykkfall_HX24(i) = res_HX24{i}.Trykkfall(1);

    res_water{i} = OKS_optimal_parameterstudie( 'Ru', myRuCases(i), 'Brine', 'water', 'T', 1);
    trykkfall_water(i) = res_water{i}.Trykkfall(1);
end

```

(a) Ruhet

```

myTEMPCases = [ -3 -2 -1 0 1 2 3 4 ]; %celsius

for i = 1:length(myTEMPCases)
    res_HX35{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Brine', 'HX35', 'T', myTEMPCases(i));
    trykkfall_HX35(i) = res_HX35{i}.Trykkfall(1);

    res_HX24{i} = OKS_optimal_parameterstudie('Brine', 'HX24', 'T', myTEMPCases(i));
    trykkfall_HX24(i) = res_HX24{i}.Trykkfall(1);
end

myTEMPCasesWater = [ 1 2 3 4 ]; %celsius
|
for i = 1:length(myTEMPCasesWater)
    res_water{i} = OKS_optimal_parameterstudie( 'Brine', 'water', 'T', myTEMPCasesWater(i));
    trykkfall_water(i) = res_water{i}.Trykkfall(1);
end

```

(b) Temperatur

Figur F.2: Matlab- script for parameterstudie: a) Ruhet og b) Temperatur





# Tillegg G

## Pumpekarakteristikk

**wilo**

Kontaktperson  
E-post  
Telefon

Kunde

Kontaktperson  
E-post  
Telefon

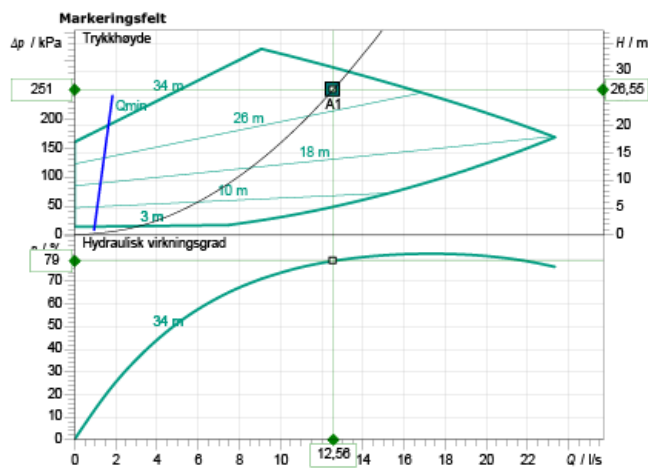
### Tekniske data

Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe  
Stratos GIGA 80/1-37/5,3

Prosjektnavn **Masteroppgave og pumpekarakteristikk**

Prosjektnummer  
Monteringssted  
Kundepostjongsnummer

Dato **01.08.2022**



### Driftsdataangivelse

Væskestrøm 12,56 l/s  
Trykkehøyde 26,55 m  
Transportmedium HX35 100 %  
Medietemperatur 3,00 °C  
Tetthet 963,70 kg/m<sup>3</sup>  
Kinematisk viskositet 5,47 mm<sup>2</sup>/s

### Hydrauliske data (driftspunkt)

Væskestrøm 12,56 l/s  
Trykkehøyde 26,55 m  
Effektbehov P1 4,35 kW  
NPSH 2,60 m

### Produktdata

Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe  
Stratos GIGA 80/1-37/5,3  
Driftstype dp-v  
Maks. driftstrykk: 1600 kPa  
Medietemperatur -20 °C ... +140 °C  
Maks. omgivelsestemperatur 40 °C  
Minsteeffektivitetsindeks (MEI) ≥ 0.7

### Motordata pr. motor/pumpe

Motorkonstruksjon EC-motor  
Effektivitetsklasse IE5  
Nettkobling 3~ 400 V / 50 Hz  
Godkjent spenningstoleranse +10 %  
Maks. turtall 3750 1/min  
Nominell effekt P2 5,30 kW  
Nominell strøm 9,60 A  
Beskyttelsesklasse IP55  
Isolasjonsklasse F  
Motorvern PTC integrated

### Tilkoblingsmål

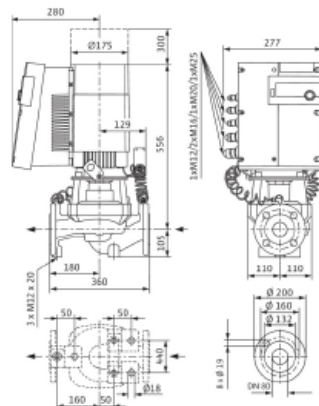
Rørtilkobling på sugesiden DN 80, PN 16  
Rørtilkobling på trykksiden DN 80, PN 16  
Bygningskonstruksjon 360 mm

### Materialer

Pumpehus 5.1301/EN-GJL-250  
Løpehjul PPS-GF40  
Lanterne 5.1301, EN-GJL-250 KTL-belegg  
Aksel 1.4542  
Akselbetning AQ1EGG

### Bestillingsinformasjon

Vekt ca. 61 kg  
Artikkelnummer 2170132





Kontaktperson  
E-post  
Telefon

Kunde

Kontaktperson  
E-post  
Telefon

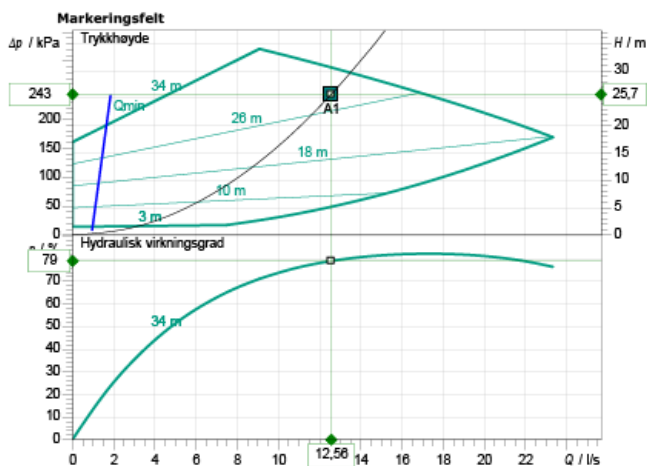
## Tekniske data

### Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe Stratos GIGA 80/1-37/5,3

Prosjektnavn Masteroppgave og pumpekarakteristikk

Prosjektnummer  
Monteringssted  
Kundeopplagsnummer

Dato 01.08.2022



#### Driftsdataangivelse

Væskestrøm	12,56 l/s
Trykkehøyde	25,70 m
Transportmedium	HX35 100 %
Medietemperatur	3,00 °C
Tetthet	963,70 kg/m <sup>3</sup>
Kinematisk viskositet	5,47 mm <sup>2</sup> /s

#### Hydrauliske data (driftspunkt)

Væskestrøm	12,56 l/s
Trykkehøyde	25,70 m
Effektbehov P1	4,21 kW
NPSH	2,61 m

#### Produktdata

##### Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe Stratos GIGA 80/1-37/5,3

Driftstype	dp-v
Maks. driftstrykk:	1600 kPa
Medietemperatur	-20 °C ... +140 °C
Maks. omgivelsestemperatur	40 °C
Minsteeffektivitetsindeks (MEI)	≥ 0,7

#### Motordata pr. motor/pumpe

Motorkonstruksjon	EC-motor
Effektivitetsklasse	IE5
Nettkobling	3~ 400 V / 50 Hz
Godkjent spenningstoleranse	+/-10 %
Maks. turtall	3750 1/min
Nominell effekt P2	5,30 kW
Nominell strøm	9,60 A
Beskyttelsesklasse	IP55
Isolasjonsklasse	F
Motorvern	PTC integrated

#### Tilkoblingsmål

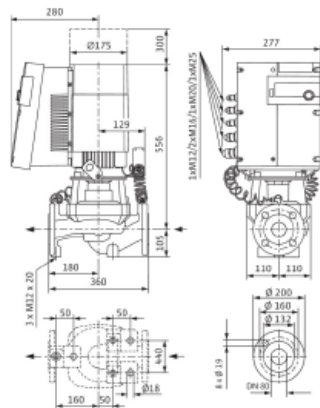
Rørtilkobling på sugesiden	DN 80, PN 16
Rørtilkobling på trykksiden	DN 80, PN 16
Bygningskonstruksjon	360 mm

#### Materialer

Pumpehus	5.1301/EN-GJL-250
Løpehjul	PPS-GF40
Lanterne	5.1301, EN-GJL-250 KTL-belegg
Aksel	1.4542
Akseltetning	AQ1EGG

#### Bestillingsinformasjon

Vekt ca.	61 kg
Artikkelnummer	2170132



Med forbehold om endringer

Programvareversjon Spaix, Versjon 4.3.13 - 2021/02/23 (Build 180)  
Dataversjon 23.06.2022

Sider 3 / 5

Figur G.2: Pumpekarakteristikk for Wilo Stratos GIGA 80/1-37/5,3 for optimaliseringsscenario 1

Kontaktperson  
E-post  
Telefon

Kunde

Kontaktperson  
E-post  
Telefon

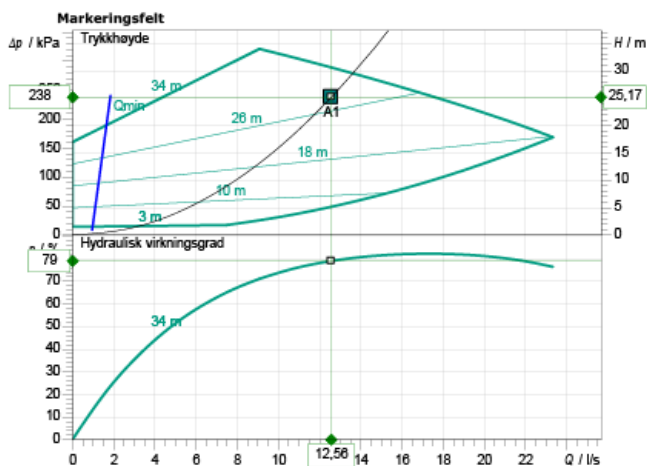
## Tekniske data

### Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe Stratos GIGA 80/1-37/5,3

Prosjektnavn **Masteroppave og pumpekarakteristikk**

Prosjektnummer  
Monteringssted  
Kundeopposisjonsnummer

Dato 01.08.2022



#### Driftsdataangivelse

Væskestrøm	12,56 l/s
Trykkehøyde	25,17 m
Transportmedium	HX35 100 %
Medietemperatur	3,00 °C
Tetthet	963,70 kg/m <sup>3</sup>
Kinematisk viskositet	5,47 mm <sup>2</sup> /s

#### Hydrauliske data (driftspunkt)

Væskestrøm	12,56 l/s
Trykkehøyde	25,17 m
Effektbehov P1	4,11 kW
NPSH	2,61 m

#### Produktdata

Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe Stratos GIGA 80/1-37/5,3	
Driftstype	dp-v
Maks. driftstrykk:	1600 kPa
Medietemperatur	-20 °C ... +140 °C
Maks. omgivelsestemperatur	40 °C
Minsteeffektivitetsindeks (MEI)	≥ 0,7

#### Motordata pr. motor/pumpe

Motorkonstruksjon	EC-motor
Effektivitetsklasse	IE5
Nettkobling	3~ 400 V / 50 Hz
Godkjent spenningstoleranse	+/-10 %
Maks. turtall	3750 1/min
Nominell effekt P2	5,30 kW
Nominell strøm	9,60 A
Beskyttelsesklasse	IP55
Isolasjonsklasse	F
Motorvern	PTC integrated

#### Tilkoblingsmål

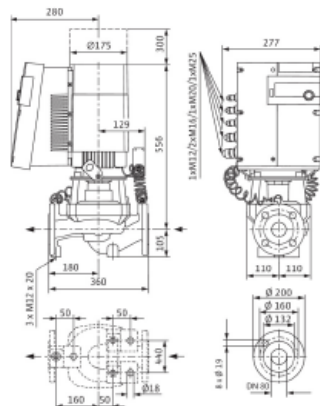
Rørtilkobling på sugesiden	DN 80, PN 16
Rørtilkobling på trykksiden	DN 80, PN 16
Bygningskonstruksjon	360 mm

#### Materialer

Pumpehus	5.1301/EN-GJL-250
Løpehjul	PPS-GF40
Lanterne	5.1301, EN-GJL-250 KTL-belegg
Aksel	1.4542
Akseltetning	AQ1EGG

#### Bestillingsinformasjon

Vekt ca.	61 kg
Artikkelnummer	2170132



Med forbehold om endringer

Programvareversjon Spaix, Versjon 4.3.13 - 2021/02/23 (Build 180)  
Dataversjon 23.06.2022

Sider 4 / 5

Figur G.3: Pumpekarakteristikk for Wilo Stratos GIGA 80/1-37/5,3 for optimaliseringsscenario 2

Kontaktperson  
E-post  
Telefon

Kunde

Kontaktperson  
E-post  
Telefon

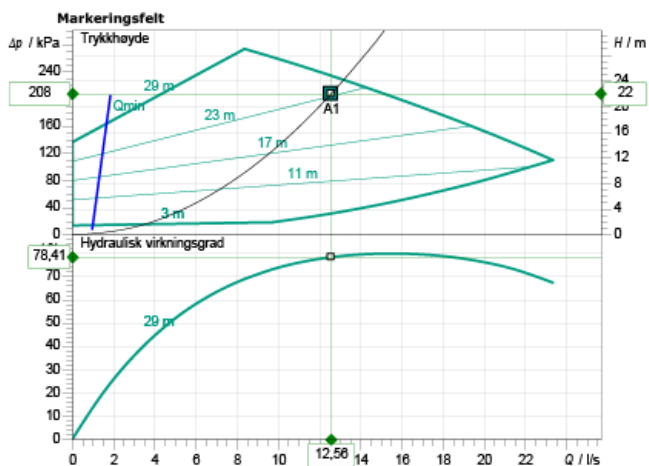
## Tekniske data

### Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe Stratos GIGA 80/1-32/4,1

Prosjektnavn Masteroppgave og pumpekarakteristikk

Prosjektnummer  
Monteringssted  
Kundepostingsnummer

Dato 01.08.2022



#### Driftsdataangivelse

Væskestrøm	12,56 l/s
Trykkehøyde	22,00 m
Transportmedium	HX35 100 %
Medietemperatur	3,00 °C
Tetthet	963,70 kg/m <sup>3</sup>
Kinematisk viskositet	5,47 mm <sup>2</sup> /s

#### Hydrauliske data (driftspunkt)

Væskestrøm	12,56 l/s
Trykkehøyde	22,00 m
Effektbehov P1	3,61 kW
NPSH	2,60 m

#### Produktdata

##### Høyeffektiv enkelt-tørrløperpumpe Stratos GIGA 80/1-32/4,1

Driftstype	dp-v
Maks. driftstrykk:	1600 kPa
Medietemperatur	-20 °C ... +140 °C
Maks. omgivelsestemperatur	40 °C
Minsteeffektivitetsindeks (MEI)	≥ 0.7

#### Motordata pr. motor/pumpe

Motor konstruksjon	EC-motor
Effektivitetsklasse	IE5
Nettkobling	3~ 400 V / 50 Hz
Godkjent spenningstoleranse	+/-10 %
Maks. turtall	3750 1/min
Nominell effekt P2	4,10 kW
Nominell strøm	7,90 A
Beskyttelsesklasse	IP55
Isolasjonsklasse	F
Motorvern	PTC integrated

#### Tilkoblingsmål

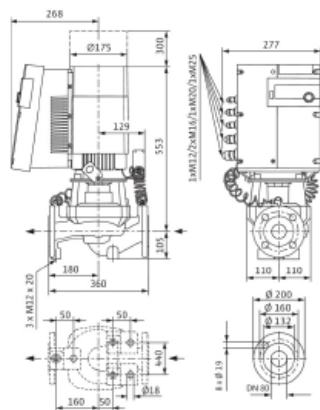
Rørtilkobling på sugesiden	DN 80, PN 16
Rørtilkobling på trykksiden	DN 80, PN 16
Bygningskonstruksjon	360 mm

#### Materialer

Pumpehus	5.1301/EN-GJL-250
Løpehjul	PPS-GF40
Lanterne	5.1301, EN-GJL-250 KTL-belegg
Aksel	1.4542
Akseltetning	AQ1EGG

#### Bestillingsinformasjon

Vekt ca.	61 kg
Artikkelnummer	2170133



Med forbehold om endringer

Programvareversjon Spaix, Versjon 4.3.13 - 2021/02/23 (Build 180)  
Dataversjon 23.06.2022

Sider 5 / 5

Figur G.4: Pumpekarakteristikk for Wilo Stratos GIGA 80/1-37/4,1 for optimaliseringsscenario 3

## Tillegg H

# Tilleggsinformasjon om OKS

Brønn	Dybde	Dybde til fjell	Fjellgrunn
EBA1	310	30	Hvitt berg
EBA4	310	24	Hvitt berg
EBA6	180	31	Hvitt berg
RB1	265	25	Hvitt berg
EBB1	310	34	Hvitt berg
EBB2	310	33	Hvitt berg
EBB3	250	30	Hvitt berg
EBB4	190	37	Svart berg
EBB5	250	29	Hvitt berg
EBB6	310	30	Hvitt berg
EBB7	293	30	Hvitt berg
RB2	200	35	Grått berg
EBC1	250	26	Hvitt berg
EBC2	310	25	Grått berg
EBC3	310	26	Hvitt berg
EBC4	247	24	Grått berg
EBC5	200	25	Grått berg
EBC6	310	30	Hvitt berg

Tabell H.1: Oversikt over dybde fra bakkenivå til fjell