

Analyse av energibrønn for oppvarming av kontorbygg

Jørgen Torgersen

22. mai 2019

The logo for OsloMet, featuring the text "OsloMet" in a bold, black, sans-serif font centered within a solid yellow square.

OsloMet



Kandidatnummer 13

Tilgjengelighet Åpen

OSLO METROPOLITAN UNIVERSITY
STORBYUNIVERSITETET

OsloMet – storbyuniversitetet
Institutt for bygg- og energiteknikk –
Energi og Miljø i bygg

Postadresse: Postboks 4. St. Olavs plass, 0130 Oslo
Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Telefon: 67 23 50 00
www.oslomet.no

Masteroppgave

PROSJEKTOPPGAVENS TITTEL Analyse av energibrønn for oppvarming av kontorbygg	DATO 22. mai 2019
	ANTALL SIDER: 64 ANTALL SIDER VEDLEGG: 16
FORFATTER Jørgen Torgersen	VEILEDERE Habtamu Bayera Madessa – OsloMet Mehrddad Rabani – Oslomet
UTFØRT I SAMARBEID MED Asplan Viak	

SAMMENDRAG

Grunnvarme er en mye anvendt ressurs for oppvarming av bygninger. Bygningssimulering viser seg stadig mer gjeldende for gode systemløsninger og problemløsning tilknyttet prosjektering. I den sammenheng er data fra Powerhouse Kjørbos grunnvarmesystem benyttet for validering av resultater fra simuleringprogrammet IDA ICE. Valideringen viser tilfredsstillende sammenheng mellom målte og simulerte verdier for temperatur i varmekjerner. Ved hjelp av IDA ICE utføres sensitivitetssanalyser for å belyse hvilke parametere i grunnvarmesystemet som har størst innvirkning på energioptak i grunnen samt energikonsum i topp- og grunnlast, og i hvilken grad. Det viser seg at borehullenes antall og dybde utgjør størst betydning for nevnte energiposter, etterfulgt av varmekjernerens massestrøm. Referansebygg og -system optimaliseres for å minimere energikonsum i topp- og grunnlast. På bakgrunn av optimalisering gjennomføres en økonomisk betraktning for å belyse forhold mellom energikonsum og investeringskostnader. Basert på resultater fra optimalisering foreslås en avveining av investeringskostnader og redusert energikonsum.

3 stikkord:

IDA ICE

Energi

Optimalisering

Sammendrag

Grunnvarme er en mye anvendt ressurs for oppvarming av bygninger. Bygningssimulering viser seg stadig mer gjeldende for gode systemløsninger og problemløsning tilknyttet prosjektering. I den sammenheng er data fra Powerhouse Kjørbos grunnvarmesystem benyttet for validering av resultater fra simuleringsprogrammet IDA ICE. Powerhouse Kjørbo består av flere bygninger i Kjørboparken i Sandvika, Bærum. De to første bygningene i Powerhouse Kjørbo er rehabiliterte kontorbygg fra 1980-tallet. Til sammen har disse et bruksareal på omtrent 5200 m^2 og er miljøklassifisert til høyeste sertifisering i BREEAM-NOR: Outstanding. Grunnvarmesystemet ved Powerhouse Kjørbo brukes som referansesystem gjennom denne oppgaven. IDA ICE med tillegg for borehull brukes for å simulere temperatur i varmbærer ut fra borehullet og termisk effekt i grunnen. Simulerte verdier sammenliknes med målte verdier ved Powerhouse Kjørbo. Resultater for validering med hensyn på temperatur viser tilfredsstillende sammenfall i målte og simulerte verdier, med $R^2 = 0,96$ og $CV_{RMSE} = 0,07$. For validering med hensyn på termisk effekt gjøres en rekke forenklinger og antakelser som medfører større avvik, $R^2 = 0,8$ og $CV_{RMSE} = 2,44$.

Sensitivitetsanalyser utføres for et referansebygg av passivhusstandard. Analysen innebærer endring av en rekke parametere for grunnvarmesystemet for å undersøke i hvilken grad de ulike parameterendringene påvirker energiopptak i grunnen samt energikonsum i topplast og grunnlast. Parameterne som undersøkes er borehullenes radius, lengde og antall, varmbærerens massestrøm, samt konduktivitet i grunn og fyllmasse. Parameterne endres prosentvis like mye i positiv og negativ retning for samtlige undersøkte uavhengige variabler. Sensitivitetsanalyse gjennomføres for tre ulike klimasteder i Norge: Oslo, Stavanger og Tromsø. Stavanger representerer et varmere klima enn de øvrige lokasjonene og Tromsø er noe kaldere. Resultater viser at blant de undersøkte parameterne påvirker antall borehull og deres lengder de undersøkte energipostene i størst grad, etterfulgt av massestrøm på varmbærer. Resultatene for Oslo- og Tromsøklima viser betydelig endring i undersøkte energiposter i forhold til referansesystemet ved sensitivitetsanalyse. For Stavangerklima er endring i energiposter nesten fraværende ved endring av referansesystemets parametere. Differanse i undersøkte energiposter er størst ved variende borehullslengde. De største forskjellene i energiposter ved parameterendring finnes ved kaldest klima. Ved 20% endring i borehullslengde for Tromsøklima viser resultater at netto energiopptak i grunnen øker med 5% ved 20% dypere borehull. Ved tilsvarende reduksjon i borehullslengde minker energiopptaket med 8%. Energikonsum i kompressoren øker med 8% ved dypere borehull, og reduseres med 10% ved grunnere hull. Topplastbidraget utvikler seg motsatt av energiopptak og -konsum i kompressor. Ved 20% økning i borehullslengde reduseres topplastbidraget med 22% og øker med 31% ved tilsvarende reduksjon i borehullslengde.

Referansebygg og -system optimaliseres ved hjelp av GenOpt kombinert med IDA ICE. Grenseverdier for inndata implementeres i simuleringsmodellen, som programvaren skal finne optimale verdier blant for å minimere energibruk. Betraktede parametere er borehullenes lengde og antall, varmbærerens massestrøm, akkumuleringstankens størrelse og vinduers U-verdi. Grenseverdier settes til rimelige verdier for passivhus og energibrønner forøvrig. Optimalisering gjennomføres for tilsvarende klimasteder som ved sensitivitetsanalyse. En økonomisk betraktning viser at investeringskostnader og energikonsum har en eksponentiell korrelasjon, hvilket fremmer forslag om en avveining mellom bespart energikonsum og investeringskostnader. Ved å tillate $0,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ økning i energikonsum ved Oslo klima, $0,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ i Stavanger klima og $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ for Tromsøklima kan investeringskostandene halveres for samtlige klimasteder.

Abstract

Ground source heat systems are widely used for building heating purposes. Simulation of building performance gets more applicable for achieving better systems and problem solving associated with engineering. Data from the ground source heat system at Powerhouse Kjørbo is applied for validation purposes of results from the simulation software IDA ICE. Powerhouse Kjørbo consist of several buildings located in Kjørboparken in Sandvika, Bærum. The two first buildings of Powerhouse Kjørbo is rehabilitated office buildings from the 1980's. Together, these two buildings have a floor area of approximately 5200 m^2 and are ranked to the highest certification in BREEAM-NOR: Outstanding. The ground source heat system at Powerhouse Kjørbo is considered as a reference system throughout this thesis. IDA ICE with Borehole Extension is used to simulate outlet brine temperature from the borehole module and the thermal effect in the ground. Simulated values are compared to measured values at Powerhouse Kjørbo. Validation results regarding temperature show satisfactory correlation between measured and simulated values, with $R^2 = 0,96$ and $CV_{RMSE} = 0,07$. For validation regarding thermal effect, several simplifications and assumptions are made which causes greater error, $R^2 = 0,8$ and $CV_{RMSE} = 2,44$.

Sensitivity analysis is performed using a reference building of passive house standard. The analysis involve changing the values for several parameters in the ground source heat system to assess impact the changes has on energy withdrawn from the ground and the energy consumption for both top heating and base heating. The investigated parameters are borehole radius, length and numbers, the mass flow rate of brine and thermal conductivity of both ground and grout. The parameters are changed with the same relative amount in both positive and negative directions for all investigated independent variables. Sensitivity analysis is carried out for three different climate locations in Norway: Oslo, Stavanger and Tromsø. Stavanger represents a warmer climate than the other locations and Tromsø is colder. Results show that among the investigated parameters, the number of boreholes and their depth has the most impact on the energy posts, followed by the mass flow rate of brine. Results for Oslo and Tromsø climate show relative change compared to the reference system. For Stavanger climate, the relative changes are small. Difference in the investigated energy posts is greatest with varying bore hole depth at the location with the coldest climate. By varying the borehole depth by 20% in Tromsø climate, the results show that net energy withdrawn from the ground increase by 5% with deeper holes. With corresponding reduction of borehole depth, the energy withdrawal is reduced by 8%. Energy consumption in the compressor increases by 8% with deeper boreholes and is reduced by 10% for shallower holes. The top heating contribution has an opposite development when varyin the parameters, compared to the other energy posts. By increasing borehole depth by 20%, top load contribution decreases by 22% and increases by 31% with corresponding reduction of borehole depth.

Reference building and system are optimized by using the software GenOpt combined with IDA ICE. This involves setting intervals for input data in the simulation model, for the software to find optimal values among. The parameters considered are the number of boreholes, their length, masseflow of brine, the size of the accumulation tank and U-values of the windows in the reference building. Upper and lower limits for the parameters are set according to reasonable values for passive house and ground source heat systems in general. Optimization is carried out for the same climate locations as for sensitivity analysis. An economic consideration shows that investment costs and energy consumption has an exponential correlation, which promotes the suggestion of a trade-off between energy consumption and investment cost. By accepting $0,3kWh/(m^2 \cdot \text{år})$ increase in energy consume for Oslo climate, $0,4kWh/(m^2 \cdot \text{år})$ in Stavanger climate and $0,8kWh/(m^2 \cdot \text{år})$ in Tromsø climate, investment cost can be halved for all climate locations.

Forord

Dette prosjektet er min avsluttende oppgave på mastergraden innen Energi og Miljø ved OsloMet – Storbyuniversitetet.

Det er et privilegium å få mulighet til å studere og samarbeide med noen av Norges fremste innen sine felt. Med det vil jeg rette en spesiell takk til veiledere, førsteamanuensis Habtamu Bayera Madessa og doktorgradsstipendiat Mehrdad Rabani ved OsloMet. Forelesere ved OsloMet undervisningsårene 2017/2018 og 2018/2019 takkes også for god formidling av fagstoff.

Jeg ønsker også å takke venner og familie for støtte, ikke bare under prosjektperioden, men for å kunne fullføre et langt utdanningsløp. Medstudenter takkes for konstruktiv diskusjon og samarbeid. Den største takknemligheten går til min samboer Emilie for å være en uvurderlig støttespiller.

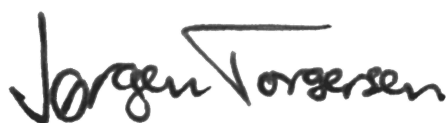
Samarbeidspartner Asplan Viak takkes for å stille med kontorplass i prosjektperioden. Som fremtidig arbeidstaker i Asplan Viaks VVS-avdeling, kan jeg ikke si annet enn at jeg gleder meg til fortsettelsen. At jeg får bruke data fra deres sentraldrifts-anlegg definerer deler av denne oppgaven. Det at man alltid kan stikke innom et kontor eller spørre noen i kontorlandskapet er en uvurderlig ressurs og trygghet. Jeg ønsker å rette en spesiell takk til sivilingeniør Olav Rådstoga, som har bidratt med redegjøring og forklaring av tekniske anlegg og henvist til andre der han mente dem kunne hjelpe.

VVS-bransjen er i en rivende utvikling, og man ser stadig smartere løsninger for VVS-systemer. Disse bidrar til gode brukeropplevelser i tillegg til å fungere som energibesparende tiltak. Ny teknologi sørger for stadig bedre løsninger og økte ambisjoner.

”Our population and our use of the finite resources of planet Earth are growing exponentially, along with our technical ability to change the environment for good or ill.”

Stephen Hawking

OsloMet, Institutt for bygg- og energiteknikk, 22. mai 2019.



Jørgen Torgersen

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Problemstilling	2
1.2	Forskningsspørsmål	2
1.3	Avgrensning	3
1.4	Samfunnsmessig og faglig relevans	4
2	Teori	5
2.1	Termodynamikk	5
2.2	Varmepumper	8
2.2.1	Effektfaktor	8
2.2.2	Komponentene	8
2.2.3	Arbeidsmedium	10
2.3	Grunnvarme	10
2.3.1	Oppvarming	10
2.3.2	Passiv kjøling	11
2.4	Simuleringsverktøy	11
2.4.1	SIMIEN	12
2.4.2	EnergyPlus	12
2.4.3	IDA ICE	12
2.4.4	GenOpt – Generic Optimization Program	12
2.4.5	MOBO – Multi Objective Building Optimization	12
2.4.6	Powerhouse Kjørbo	13
3	Metode	14
3.1	Referansesystem	14
3.1.1	Inndata	15
3.2	Referansebygg	19
3.2.1	Inndata	19
3.2.2	Varmebehov	22
3.2.3	Kjølebehov	22
3.3	IDA ICE	23
3.3.1	ESBO-anlegg	23
3.3.2	Luftbehandlingsenhet	26
3.3.3	Sonemodell	28
3.3.4	Romenheter – varme og kjøling	29
3.4	Validering	30
3.5	Sensitivitetsanalyse	34
3.6	Parametrisk analyse og GenOpt	35
3.6.1	Kostnadsvurdering	37
4	Resultater og diskusjon	38
4.1	Årlig energibehov	38
4.2	Temperaturforløp i grunn	39
4.3	Validering	41
4.4	Sensitivitetsanalyse	44
4.5	Optimalisering	54
4.5.1	Økonomisk betraktning	55
4.6	Feilkilder	57

5	Konklusjon	60
6	Forslag til videre arbeid	61
	Referanser	64
	Vedlegg	i
A	Simuleringsmodeller – utklipp fra IDA ICE	i
B	Simuleringsresultater	ii
B.1	Termisk effekt i borehull	ii
B.2	Temperaturforløp i grunn	iii
B.3	Sensitivitetsanalyse – 10% parameterendring	xii
C	Optimaliseringsalgoritme	xvi

Figurer

1	Illustrasjon – grunnvarmesystem.	1
2	Satellittbilde av Kjørboparken. Hentet fra Google Maps.	3
3	Illustrativ beskrivelse av termodynamikkens første lov.	5
4	Energikonservering, termodynamikkens første lov.	6
5	Illustrasjon av varmpumpeprosessen.	9
6	Borehullenes plassering.	15
7	Systemskjema for valideringsmodell.	17
8	Illustrasjon av referansebygg.	19
9	Planløsning for referansebygg.	19
10	Styring for solskjerming.	20
11	Flytskjema – Energianlegg.	24
12	Effekt-varighetskurve – Eksempel.	25
13	Systemskjema – Luftbehandlingsenhet.	26
14	Illustrasjon – tilluftsmengder.	28
15	Illustrasjon av kvadratsummer.	31
16	Punktdiagram – massestrøm.	33
17	Temperatur i grunn – noder.	34
18	Temperaturforløp i grunnen – referansesystem	39
19	Utklipp fra IDA ICE – animasjon av grunntemperatur.	40
20	Sammenlikning av T_{ut}	41
21	Punktdiagram – temperatur.	42
22	Punktdiagram – termisk effekt.	43
23	Energi – sensitivitetsanalyse Oslo	45
24	Energi – sensitivitetsanalyse Stavanger.	46
25	Energi – sensitivitetsanalyse Tromsø.	47
26	Tornadodiagram – 20% parameterendring, Oslo klima.	49
27	Tornadodiagram – 20% parameterendring, Stavanger klima.	50
28	Tornadodiagram – 20% parameterendring, Tromsø klima.	51
29	COP – sensitivitetsanalyse.	52
30	COP – relativ endring.	53
31	Energikonsum versus investeringskostnader.	55
32	Spesifikk varmekapasitet – Etanol-/vannblanding.	59
33	ESBO-anlegg benyttet for validering.	i
34	ESBO-anlegg benyttet for analyser.	i
35	Sammenlikning av termisk effekt.	ii
36	Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, Oslo klima	xii
37	Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, Stavanger klima	xiii
38	Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, Tromsø klima	xiii
39	Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, COP – Oslo klima	xiv
40	Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, COP – Stavanger klima	xiv
41	Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, COP – Tromsø klima	xv

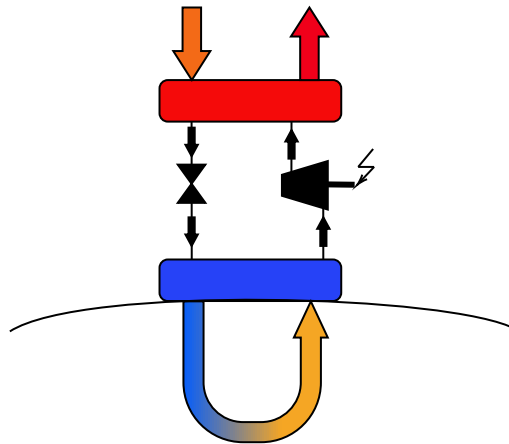
Tabeller

1	Inndata – borehull.	16
2	Inndata – referansebygg.	21
3	Aktivitetsnivå og varmetilskudd.	21
4	Energikrav – passivhus.	22
5	Parameterverdier ved referansesystem og endringer.	34
6	Priser – kostnadsvurdering.	37
7	Simulerte resultater – spesifikt energibehov.	38
8	Resultat – energioptimalisering.	54
9	Parameterstørrelser ved energioptimalisering.	54
10	Avveining – Energi og kostnad.	56
11	Parameterstørrelser – avveid systemløsning.	56

1 Introduksjon

Denne masteroppgaven omhandler ytelsesanalyse av grunnvarmesystemer. Grunnvarme er en mye anvendt ressurs for bruk til rom- og tappevannsoppvarming. Varmen kan nyttiggjøres ved hjelp av en eller flere energibrønner og varmepumper, med dimensjoner avhengig av varmebehov og varme tilgjengelig i grunnen. For at slike energisystemer skal kunne fungere optimalt, må man ha kjennskap til en rekke faktorer for å kunne prosjektere riktig. Målet med denne oppgaven er å kaste lys på hvilke av disse faktorene som gjør utslag på energi og kostnad, og i hvilken grad de ulike faktorene påvirker energi og kostnad.

Grunnvarme er ofte tilgjengelig i nærheten av lokalene som skal utnytte den og varmen hentes fra reservoarer så store at energikilden er å anse som fornybar. Denne oppgaven vil i hovedsak omhandle varmeproduksjon ved varmepumpe og energibrønner. Ved Powerhouse Kjørbo benyttes energibrønner for å forsyne bygningsmassen med varme og kjøling. Kollektorslanger ligger i bakken, hvor væske sirkulerer og fungerer som varmebærer. Denne væsken strømmer fra grunnen, opp til en varmepumpe hvor den sørger for tilstrekkelig temperaturløft i arbeidsmediet. Når varme fra grunnen er avgitt i varmepumpen, føres væsken tilbake til brønnen, hvor den varmes opp på ny og syklusen gjentas. Se illustrasjon i Figur 1.



Figur 1: Illustrasjon – grunnvarmesystem.

Ved Powerhouse Kjørbo i Bærum finnes to brønnparker. Data fra den ene av dem er brukt til valideringsformål i denne oppgaven. Et Powerhouse er et plusshus, hvor målet er at bygget skal produsere mer fornybar energi enn det forbruker i løpet av levetiden. Med forbruk av energi menes energi som kreves for å drifte, produsere materialer, bygge og avhende bygget (Powerhouse.no, u.d.). For å nå målsettingen for et Powerhouse, kreves kontinuerlige målinger for å beregne energibruk og -produksjon. Det er i denne sammenheng energisystemene ved Powerhouse Kjørbo egner seg bra for denne oppgaven, ettersom data for temperatur, trykk, massestrømmer og settpunkter i de tekniske anleggene er lagret og tilgjengelig via Sentral Drift-anlegg (SD-anlegg).

Til denne oppgaven har Asplan Viak vært behjelpelig ved å tilrettelegge for bruk av SD-anlegg ved Powerhouse Kjørbo, samt å forklare og redegjøre for de tekniske systemene og valgene som ble tatt i prosjekteringsfasen. Byggherre, Entra har gitt tilgang til SD-anlegget for gjennomføring av denne masteroppgaven. Oppgaven ble til etter en sommerjobb i VVS-avdelingen hos Asplan Viak, ved hovedkontoret i Sandvika. Etter samtale med avdelingsleder og gruppeleder, samt flere

av ingeniørene på avdelingen ble det besluttet at et samarbeid om masteroppgave var aktuelt. Veileder ved Oslomet foreslo så en problemstilling knyttet til det Asplan Viak kunne bidra med, i form av data fra SD-anlegg og kompetanse på de aktuelle systemene.

Programvaren IDA ICE benyttes for å betrakte grunnvarmesystemet i dette prosjektet, med programtillegg for borehull. Simuleringsresultater fra IDA ICE sammenliknes med målte verdier fra Powerhouse Kjørbo for validering. Deretter gjennomføres en sensitivitetsanalyse for å undersøke i hvilken grad uavhengige variabler påvirker avhengige variabler i grunnvarmesystemet. Til sist gjennomføres en parametrisk analyse for optimalisering ved hjelp av GenOpt i IDA ICE for å finne optimale størrelser for uavhengige variabler med hensyn på energiforbruk.

1.1 Problemstilling

I dette prosjektet skal ulike parameteres påvirkning på energioptak i grunnen og energikonsum undersøkes. Energikonsumet skal minimeres ved optimalisering av et referansebygg for å undersøke hvilke tiltak som kreves og økonomiske konsekvenser av dette.

Problemstilling: Synliggjøre sammenheng mellom ulike parameteres påvirkning på energioptak i grunn og kartlegge optimale forutsetninger for energibrønn med hensyn på energi.

Sensitivitetsanalyse og parametrisk analyse gjennomføres for tre ulike steder i landet; Oslo, Tromsø og Stavanger. Dette er for å belyse energibruk og -besparelse ved optimalisering og ulike parameteres påvirkning på energibruk.

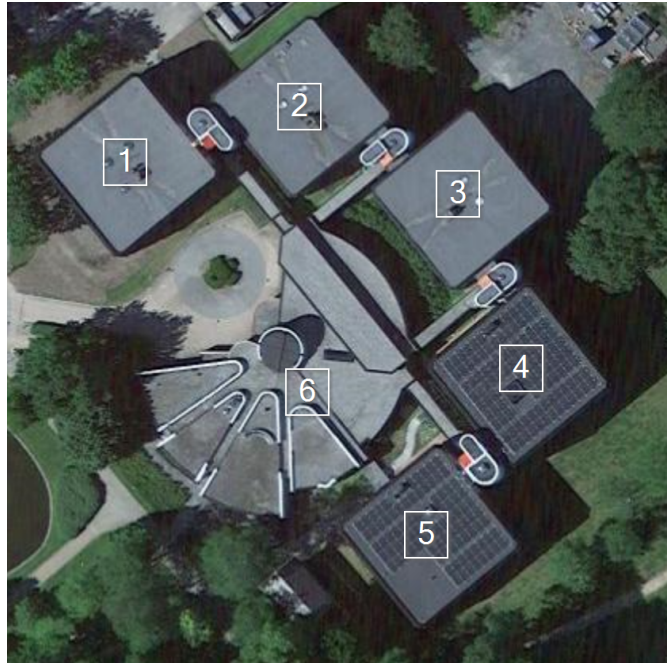
1.2 Forskningsspørsmål

For å løse denne oppgaven, skal følgende forskningsspørsmål besvares:

- Hvor godt stemmer simulerte resultater i IDA ICE med målte verdier for temperatur og termisk effekt ved bruk av tillegg for borehull?
- Hvilke parametere har størst påvirkning på energioptak i brønnparken, og i hvilken grad påvirkes energioptaket?
- Hvor mye energi kan man spare på et optimalisert system sammenliknet med et referansesystem ved ulike steder i Norge?

1.3 Avgrensning

For valideringsformål er denne oppgaven avgrenset til å omhandle én av to energisentraler ved Powerhouse Kjørbo. Kjørboparken består av flere bygninger. Bygningene som dekkes av den aktuelle energisentralen i denne oppgaven er bygningene 4 og 5, som illustrert i Figur 2.



Figur 2: Satellittbilde av Kjørboparken. Hentet fra Google Maps.

Ettersom data fra Powerhouse Kjørbo er tilgjengelig for valideringsformål, er det naturlig å benytte dette for analyser i tilsvarende bygg. Videre analyser i denne oppgaven omhandler dermed et passivhus kontorbygg.

For sensitivitetsanalyse og optimalisering benyttes et referansebygg modellert i IDA ICE, som oppfyller krav til passivhusstandard for næringsbygg. Ved sensitivitetsanalyse betraktes energioptak og tilførsel i grunnen, energikonsum i topplast og energikonsum i varmepumpens kompressor. Begrensning i antall undersøkte parametere foretas på grunn av lang simuleringstid. Parameterne som undersøkes er borehullenes lengde, radius og antall, massestrøm i varmebærer samt konduktivitet for grunn og fyllmasse.

Optimalisering gjennomføres med hensyn på variablene som i sensitivitetsanalysen viser seg å være mest følsom for endring i energi: borehullenes lengde, antall og varmebærerens massestrøm. I tillegg inkluderes U-verdi for vinduer og akkumuleringstankens størrelse for optimaliseringsformål. Vinduers U-verdi inkluderes for å undersøke tiltak som kan påvirke energiforbruket i bygningsmassen. Sensitivitetsanalyse og optimalisering gjennomføres for tre store byer i Norge. For å undersøke steder med relativt ulikt klima og samtidig avgrense oppgaven til et rimelig omfang velges byene Oslo, Stavanger og Tromsø. Ved å velge disse byene undersøker man et mildt klima med høy årsmiddeltemperatur i Stavanger, et noe kjøligere klima i Oslo og et sted med kaldt kystklima i Nord-Norge, Tromsø.

1.4 Samfunnsmessig og faglig relevans

Denne oppgaven er samfunnsmessig relevant ettersom verdens energiforbruk må reduseres for å nå klimamål og unngå ytterligere oppvarming av jordas atmosfære. Norges klimalov sier blant annet at Norge skal være et lavutslippssamfunn i 2050 (Klimaloven, 2018). Dette innebærer blant annet å begrense bruken av fossilt brennstoff ved å benytte alternative energikilder. Fornybare energikilder og energieffektive løsninger er fordelaktig for å dra utviklingen i riktig retning. Ny teknologi utvikles i rekordfart. Nye, miljøvennlige og fornybare løsninger blir stadig billigere og dermed mer attraktive. Valg av slike løsninger som minimerer klimagassutslipp må ikke bare være billige, men tilgjengelige og alt i alt et bedre alternativ enn konvensjonelle, forurensende energikilder. Politikk må føres til fordel for fornybar energi og energieffektive systemer. Forhåpentligvis kan denne oppgaven være med på å understreke muligheten for, og viktigheten av dette.

Vi mennesker oppholder oss mesteparten av livet innendørs. Derfor er det viktig at man har et godt innemiljø uten at det går ut over helse, økonomi og klima. I og med at vi oppholder oss mye innendørs, foregår naturligvis mye av menneskers energikonsum innendørs. Ettersom behovet for energi innendørs reduseres ved bruk av fornybare og energieffektive løsninger, bidrar dette til å nå klimamål samtidig som man ivaretar helsemessige og økonomiske interesser.

Undersøkelser som utføres i denne masteroppgaven er av faglig relevans ved at man kan oppnå besparelse ved kostnader og energibruk. Dersom tekniske anlegg prosjekteres riktig og man i tidlig fase tar riktige avgjørelser kan man spare både kostnader og energi. På denne måten kan man unngå over-/underdimensjonering og merkostnader som følger av dette. Ved bruk av programvare for å simulere virkning av ulike tiltak i bygninger kan man oppdage og unngå uønskede scenario før bygget er oppført. Særdeles nyttig er det å forutse hvilke faktorer som påvirkes av avgjørelser i tidlig fase, når man har mulighet til å endre disse før det er for sent.

2 Teori

I dette kapitlet redegjøres det for grunnleggende termodynamisk teori som anvendes i oppgaven, samt varmpumper og deres virkemåte.

2.1 Termodynamikk

Termodynamikk er en gren av fysikk som beskriver sammenhengen mellom energi og arbeid.

Termodynamikkens lover

Det finnes ulike inndelinger av termodynamikkens lover. De kalles også hovedsetninger. For å kunne lese og forstå lovene, må begrepet *system* etableres. Et termodynamisk system kan sies å være en masse eller annet innhold, som er åpent, lukket eller isolert, hvis egenskaper beskrives av variabler som for eksempel temperatur, trykk, entropi, entalpi eller masse. Et isolert system tillater ikke energi-/varmeoverføring eller massetransport til omgivelsene utenfor systemet. I et lukket system er det ingen massetransport til omgivelsene, men energi kan overføres over systemgrenser og åpne systemer tillater overføring av både masse og energi.

Termodynamikkens lover beskrives i henhold til Cengel & Boles (2015):

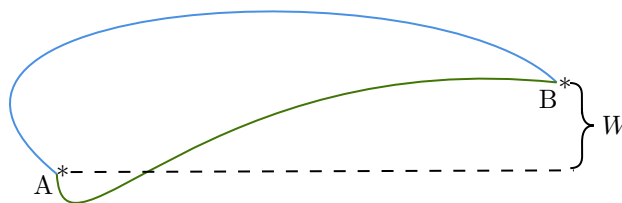
0. *Dersom to systemer A og B er i termisk likevekt med et tredje system C, er også systemene A og B i termisk likevekt med hverandre.*

Denne loven danner grunnlaget for begrepet temperatur. Dersom to systemer er i termisk likevekt, vil ingen varme strømme mellom dem og da følger det at systemene har samme temperatur.

1. *Energimengden er konstant.*

Den første hovedsetningen beskriver at energi ikke kan oppstå eller forsvinne, men kan endre form. Følgende indikeres: *For alle adiabatisk prosesser mellom to tilstander i et lukket system, er netto arbeid utført alltid det samme, uavhengig av systemets natur og detaljene i prosessen.*

Altså gjelder det at uansett metode kommer man alltid til samme konklusjon for netto arbeid utført i et lukket system, uansett hvilke midler som tar en til målet. Dette kan forklares illustrativt, se Figur 3.



Figur 3: Illustrativ beskrivelse av termodynamikkens første lov.

I et lukket system vil alltid netto arbeid utført, W , mellom tilstand A og tilstand B være likt, uavhengig av "veien" man velger mellom A og B.

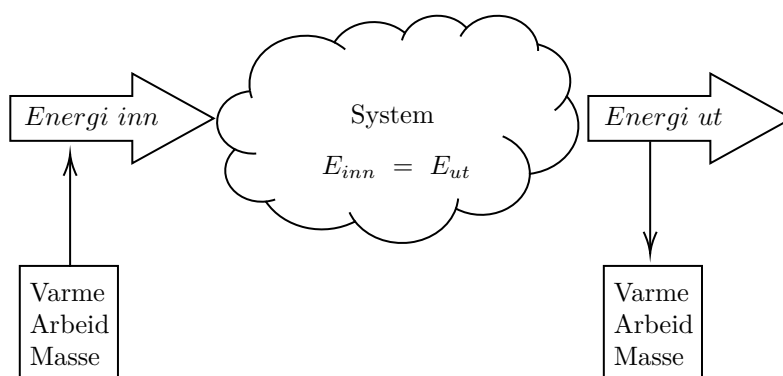
Termodynamikkens første lov er også matematisk formulert, se Formel 1:

$$\Delta U = Q + W \quad (1)$$

Hvor ΔU er endring i systemets indre energi, Q er varme og W er mekanisk arbeid. Følgende gjelder for den matematiske formuleringen:

- $Q < 0 \rightarrow$ varme tas *ut* av systemet
- $Q > 0 \rightarrow$ varme *tilføres* systemet
- $W < 0 \rightarrow$ arbeid utføres *på* systemet
- $W > 0 \rightarrow$ arbeid utføres *av* systemet

Energikonservering illustreres i Figur 4.



Figur 4: Energikonservering, termodynamikkens første lov.

2. *Summen av entropi i et termodynamisk system vil alltid øke.*

Entropi kan beskrives som graden av uorden i systemet, og angis i enheten J/K. Denne loven danner grunnlag for en positiv definert retning av varme, fra et system med høy energi til et system med lavere energi, altså fra varmt til kaldt. Loven understreker at alle naturlige prosesser er irreversible og at man dermed ikke spontant kan omforme termisk energi til mekanisk arbeid. En slik prosess vil medføre et visst tap.

Andre hovedsetning kan formuleres matematisk, som vist i Formel: 2

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (2)$$

Hvor ΔS er endring i entropi, ΔQ endring i systemets varme og T er absolutt temperatur. Entropi er det som forteller oss hvor godt energien vår anvendes. Generert entropi representerer avviket til en ideell termodynamisk prosess. I praksis betyr dette at man ønsker å minimere generering av entropi, slik at man får nyttiggjort mest mulig av energien man anvender.

Stephen Hawking har beskrevet termodynamikkens andre lov som angiver av tidens retning. Ettersom graden av uorden i isolerte systemer alltid øker, vil man for eksempel aldri se en knust kopp settes sammen igjen ved tilfeldigheter. I et univers hvor dette hadde funnet

sted ville graden av uorden alltid minket, og man kunne husket sin fremtid men ikke ens fortid (Hawking, 2011).

3. *Entropien til et termodynamisk system går mot en konstant verdi når dets temperatur går mot absolutt null.* Den tredje termodynamiske loven viser til at et systems entropi slutter å øke dersom temperaturen i systemet går mot absolutt null. Ved en slik temperatur slutter alle molekylære vibrasjoner og bevegelser, og man oppnår at all energi i systemet er ikke-kinetisk. Denne loven har ett unntak, og det gjelder for glass (ikke-krystallisk fast stoff). Den konstante verdien av entropi ved absolutt nullpunkt kalles restentropi.

Varmeoverføring

Varme er definert som energi som overføres fra et system med høy temperatur til et system med lavere temperatur jf. termodynamikkens andre lov. Denne overføringen kan skje ved ulike prinsipper, her presenteres tre av dem (Cengel & Ghajar, 2015):

- **Konduksjon**

Konduksjon, eller varmeledning er overføring av energi fra mer energiholdige partikler til tilstøtende mindre energiholdige partikler, som et resultat på interaksjon mellom partiklene. Dette gjelder typisk for fluider (gass/væske) eller faste stoffer som tilstøter hverandre. I gasser og væske er konduksjon et resultat av kollisjoner og diffusjon av molekylene, hvilket skyldes tilfeldige bevegelser. I faste stoffer forekommer konduksjon som kombinasjon av molekylenes vibrasjoner og energitransport ved frie elektroner.

Raten for konduksjon avhenger av en rekke faktorer; geometri, tykkelse, temperaturdifferanse mellom materialene og materialenes termiske egenskaper. For eksempel vet vi at isolasjon rundt en varmtvannstank senker raten av varmetransport fra tanken til omgivelsene. Det kommer av at isolasjonen har lavere termisk konduktivitet (varmeledningsevne) enn metallet som tanken ellers består av.

Matematisk gjelder:

$$\text{Konduksjonsrate} \propto \frac{\text{Areal} \cdot \text{Temperaturdifferanse}}{\text{Tykkelse}}$$

- **Konveksjon**

Konveksjon er varmeoverføring mellom fast stoff og et fluid (væske/gass) og omfatter en kombinasjon av konduksjon og fluidets bevegelse. Høy hastighet på fluidets bevegelse gir større konveksjonsrate enn ved lav hastighet. Ved fravær av fluid, vil varmeovergang utelukkende skje ved konduksjon. Konveksjon kan være tvungen eller naturlig. Tvungen konveksjon forekommer når et fluid tvinges til stømning ved hjelp av vifter pumper eller vind. Naturlig konveksjon er strømming som induseres av oppdriftskrefter som skyldes tetthetsforskjeller på grunn av temperaturdifferanser i fluidet.

- **Stråling**

Stråling defineres som energiavgivelse fra masse i form av elektromagnetiske bølger (fotoner), som et resultat av forandring i elektronisk konfigurasjon av atomer eller molekyler. I motsetning til ved konduksjon og konveksjon, behøver man ingen medium for varmeovergang via stråling. Dette gjelder for eksempel ved overføring av varme fra sola til jordkloden, hvor man har vakuum mellom himmellegemene og varmeoverføring fortsatt forekommer. I termodynamikk er man som regel interessert i termisk stråling, til forskjell fra andre typer

stråling som røntgenstråling, gammastråling, mikrobølger og radiobølger. Alle legemer avgir eller opptar termisk stråling i varierende grad. Alle legemer som innehar en temperatur over det absolutte nullpunkt avgir termisk stråling.

2.2 Varmepumper

Varmepumper er maskiner som benyttes for produksjon av varme fra elektrisk strøm. Varmepumper har en varm og en kald side, hvor den varme siden utnyttes til oppvarmingsformål og den kalde til nedkjølingsformål. En felles betegnelse for prosessene for både oppvarmings- og nedkjølingsformål er *varmepumpende prosess*. I varmepumpen sirkulerer et arbeidsmedium, som endrer fase i ulike steg, hvilket man utnytter for varmeavgivelse og -opptak. (Zijdemans 2012, s. 63.)

2.2.1 Effektfaktor

Hovedforskjellen mellom oppvarming ved varmepumper og direkte elektrisk oppvarming kan sies å være effektfaktoren (*COP – Coefficient of Performance*). Effektfaktoren angir hvor stor andel av tilført arbeid i kompressoren som omsettes til anvendt varme i varmepumpen. Matematisk beskrivelse av COP er gitt i Likning 3:

$$COP = \frac{\text{Anvendt varme, kondenser}}{\text{Tilført arbeid, kompressor}} \quad (3)$$

Tilsvarende effektfaktor finnes for anvendt kjøling over fordampere (*Energy efficiency Ratio – EER*), se Likning 4:

$$EER = \frac{\text{Anvendt kjøling, fordampere}}{\text{Tilført arbeid, kompressor}} \quad (4)$$

2.2.2 Komponentene

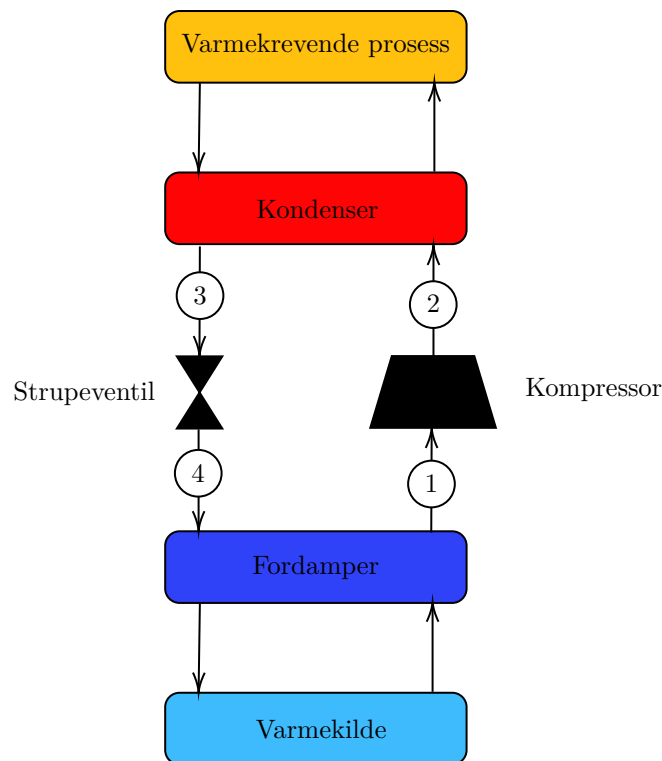
En varmepumpe består av fire hovedkomponenter:

- Kompressor
- Kondenser (også kalt kondensator)
- Ekspansjonsventil (også kalt strupeventil)
- Fordampere

Disse komponentene har fått navnene sine etter deres misjon i varmepumpens syklus. Kompressoren komprimerer arbeidsmediet, i kondenseren kondenserer arbeidsmediet, gjennom ekspansjonsventilen vil arbeidsmediet ekspandere og til sist gjennom fordampere lar man arbeidsmediet fordampe.

Varmepumpeprosessen forklares trinnvis. Se Figur 5 for illustrasjon.

- 1-2) Komprimering: Man slipper arbeidsmediet, som er i gassform, gjennom en kompressor, hvorpå trykket og temperaturen i mediet øker.
- 2-3) Kondensering: Man kjøler ned arbeidsmediet gjennom en kondenser. I dette trinnet anvender man termodynamikkens andre lov, ved at man unnytter at varme strømmer fra varmt til kaldt. Dette skjer ved at kondenseren er tilknyttet omgivelser med lavere temperatur enn arbeidsmediet. Dermed avgis varme fra arbeidsmediet til omgivelsene.
- 3-4) Ekspansjon: Etter at varmen fra arbeidsmediet er nyttiggjort, ønsker man å senke temperaturen og trykket i arbeidsmediet for å skape gode driftsvilkår for varmepumpesystemet. Dermed slipper man arbeidsmediet gjennom en strupeventil som sørger for at temperatur og trykk synker, typisk slik at arbeidsmediet går i væskefase.
- 4-1) Fordampning: Etter temperatur- og trykkreduksjon ønsker man å la arbeidsmediet absorbere energi slik at det går i gassfase igjen. Dette for å sikre at væske ikke går gjennom kompressoren, da det kan ødelegge dens komponenter. Dette gjør man typisk ved å utnytte energi fra omgivelsene. Når arbeidsmediet har tatt opp nok energi og fordampet, går det igjen gjennom kompressoren og syklusen gjentas.



Figur 5: Illustrasjon av varmepumpeprosessen.

2.2.3 Arbeidsmedium

Arbeidsmediet er stoffet man endrer fase på i en varmepumpecyklus. Det kan også kalles kulde-medier. Man utnytter energi som frigis i faseovergangen, til oppvarmings- og/eller nedkjølingsformål. Det finnes en rekke forskjellige arbeidsmedier, noen typiske eksempler er ammoniakk (R717), karbondioksid (R744), tetrafluoretan (R134a) og difluormetan (R410a). Arbeidsmedier deles typisk i to kategorier, naturlig og syntetiske hvor eksempler for disse er henholdsvis R744 og R134a. Av miljøhensyn har arbeidsmedier som er skadelige for miljøet blitt faset ut og er forbudt å bruke. Naturlige arbeidsmedier er stoffer som finnes naturlig i omgivelsene og er dermed ansett for å være et bedre alternativ enn syntetiske arbeidsmedier. For eksempel ble arbeidsmedier av klor-fluor-karbon-forbindelse (KFK) faset ut på grunn av ozonnedbrytningspotensiale (ODP - Ozone Depletion Potential). En høy verdi av ODP angir høy nedbrytning av ozonlaget. Dersom ozonlaget i stratosfæren brytes ned, vil mer av den skadelige UV-rike solstrålingen fra sola nå jordas overflate. Dette kan blant annet føre til økt forekomst av hudkreft ifølge Forskning.no (2002). Globalt oppvarmingspotensial (GWP - Global Warming Potential) hensyntas også ved bruk av arbeidsmedier. Stoffers GWP sammenliknes med CO₂, hvilket medfører at CO₂ som arbeidsmedium har GWP lik 1. Fordelen med syntetiske arbeidsmedier er at de kan manipuleres (eksempelvis ved blandning av ulike medier) slik at man får gode egenskaper for de forholdene man ønsker å benytte arbeidsmediet for. Ved bruk av naturlige kuldemedier er man i større grad avhengig av å tilpasse systemet slik at arbeidsmediet kan operere under egnede forhold med hensyn på blant annet trykk og temperatur.

2.3 Grunnvarme

Grunnvarme, også kalt bergvarme, er en mye anvendt ressurs for varme til bygninger og ansees som fornybar. Systemløsningen er indirekte og fungerer ved at man sirkulerer en væske (frostsikret) gjennom kollektorslanger som plasseres i en borebrønn. Kollektorslangene ligger typisk U-formet mellom bunnen av brønnen og varmepumpen.

2.3.1 Oppvarming

Grunnvarme anvendes ved å hente varme fra reservoarer i grunnen. En rekke grunnforhold spiller inn på hvor godt egnet reservoaret er for bruk til grunnvarme, deriblant grunnvann og strømning, samt ulike bergarter og deres fysiske og termiske egenskaper. Varmen som hentes fra grunnen brukes typisk til oppvarming av et arbeidsmedium på kald side i en varmepumpe. Varmepumpen løfter så temperatur på et prosessmedium på varm side, som benyttes til oppvarmingsformål. Av termodynamikkens andre lov gjelder det at varmeoverføring alltid skjer fra varmt til kaldt. Det er dette man utnytter i et grunnvarmesystem. Varmebæreren har en kald temperatur etter å ha vært gjennom varmepumpen. Når varmbæreren så føres ned i grunnen, vil varme tilføres varmbæreren ettersom grunnen er varmere. Den gjenoppvarmede varmbæreren er så klar til å tas inn til varmepumpen for å løfte temperaturen i arbeidsmediet.

Nødvendig dybde på borehullene avhenger av temperaturen i grunnen og ønsket effekt til varmeanlegget. Typiske lengder er fra 80 til 200 meter. En rekke faktorer påvirker effektuttaket på varmeanlegget, deriblant bergtype, temperatur, grunnvannsgjennomstrømning. Effektuttaket kan angis som antall watt per meter hulldybde. For at varmeopptaket skal være tilstrekkelig for tiltenkt formål, må det være tilpasset varmepumpen. Dersom borehullet er tørt, altså at grunnvannsgjennomstrømningen er lav eller fraværende, bør luftrommet mellom kollektorslangen og bergveggen fylles med noe for å sikre god varmeledning. Til et slik formål kan sand eller betong benyttes. Bruk av slike materialer medfører vanskeligheter ved eventuell utbygging av

kollektorslanger, noe som bør medtas i beregningen for risiko og vedlikehold. Alternativt kan hullet fylles med vann, gitt at det holdes i hullet og ikke siver ut gjennom utettheter i berget. Ved frysning øker vannets varmeledningsevne til omtrentlig samme verdier som sand og betong (Zijdemans 2012, s. 94).

2.3.2 Passiv kjøling

En av fordelene med grunnvarme er at den kan benyttes til passiv kjøling (frikjøling) på sommerstid. Dette muliggjøres ved at man i løpet av fyringssesongen henter varme fra grunnen. Dermed blir grunnen kaldere, og man kan utnytte denne "kulden" til kjøling på sommerstid. Dersom grunnvannsgjennomstrømningen i brønnen ikke er for stor, kan man lagre varmen som tas ut ved kjøling. Det skjer ved at den oppvarmede væsken (fra rommene som kjøles ned) tilføres brønnen og avleverer varmen der. Dermed blir varmen liggende til fyringssesongen og væsken i kollektorslangene tilføres brønnen med lavere temperatur, og varmes opp av den lagrede energien i brønnen. God utnyttelse av denne strategien fordrer muligens bruk av flere brønner slik at mengden varme som lagres blir tilstrekkelig.

Passiv kjøling er tilnærmet gratis kjøling i motsetning til aktiv kjøling. Hovedforskjellen på disse to kjølestrategiene er at ved aktiv kjøling brukes energi for å oppnå kjøling, og for passiv kjøling benyttes ingen energi. Dette kan helt enkelt beskrives ved å åpne et vindu for å slippe varme ut av rommet dersom varmeoverskuddet er høyt. I mer avanserte anlegg kan passiv kjøling benyttes ved bruk av energibrønner, på lik måte som for varmedrift. Da utnytter man at grunnen har relativt stabil temperatur året gjennom og man kan fjerne varme fra rom man ønsker å kjøle ned. Denne varmen sender man ned i brønnen ettersom varmebæreren får en lavere temperatur enn omgivelsene ved sommerdrift, og kan ta opp varmen man vil bli kvitt. Igjen ser man termodynamikkens andre lov i praksis. Hvilke ulike tiltak som faller inn under begrepene passiv og aktiv kjøling kan diskuteres ettersom hovedregelen er forbruk eller ikke forbruk av energi for å passe inn i definisjonene. Ved sirkulasjon av varmebærer mellom brønn og bygning benyttes pumper, altså går det med noe energi selv om strategien faller under passiv kjøling. For å bruke samme argument i det enkle eksempelet med å åpne vindu, må det også der noe energi til for å åpne vinduet enten for hånd eller ved bruk av annen aktuator. Det later til at størrelsesorden på energimengden som går med til kjøling i stor grad avgjør hvilken kategori kjølestrategien skal tilhøre. Ved bruk av en kjølemaskin medgår typisk effekt i størrelsesorden kilo, mens ved bruk av en pumpe er det snakk om relativt små effekter.

2.4 Simuleringsverktøy

Simulering av bygningers ytelse er svært nyttig i tidlig fase av byggeprosjekter. Slike verktøy brukes for undersøkelser av ulike aspekter som lyd, lys, konstruksjon og energibruk i bygninger. Disse undersøkelsene i tidlig prosjektfase bidrar til å unngå feil som fører til merkostnader og misfornøyde sluttbrukere. Enkelte simuleringsverktøy er også tilpasset standarder og forskrifter slik at beregninger som gjøres i programvaren er i henhold til gjeldene lovverk. For simulering av energibruk finnes det en rekke verktøy. Videre nevnes noen av dem.

Simulering muliggjør betraktning av ulik geografisk plassering og klima, ved hjelp av ulike klimafilene nedlastet og installert i programvaren. Klimafilene lastes ned i .prn-format og er generert fra ASHRAE IWEC 2. IWEC (International Weather for Energy Calculations) er resultater fra ASHRAE Research Project 1015 – Typical weather years for international locations. IWEC 2 inneholder data som beskriver typisk vær som kan benyttes for energisimuleringer i bygninger for 3012 lokasjoner utenfor USA og Canada (Energyplus, u.d.-b).

2.4.1 SIMIEN

Programvaren SIMIEN er utviklet av det norske selskapet Programbyggerne. Som et dynamisk beregningsprogram beregner programvaren i henhold til metoden som er beskrevet i NS 3031. Dette gjør at mange norske bedrifter benytter denne programvaren da den tufter på metoden som byggeteknisk forskrift krever at man benytter ved dynamisk beregning av energibehov. SIMIEN er også kompatibel med den europeiske standarden EN ISO 13790. Gjennom bruk av denne programvaren kan man beregne varme- og kjølebehov, årlig energiforbruk, vurdering mot byggeteknisk forskrift, energimerking og lønnsomhetsvurderinger Programbyggerne (u.d.).

2.4.2 EnergyPlus

Energyplus er et energisimuleringsprogram hvor man kan beregne blant annet energibehov til varme, kjøling, ventilasjon og lys. Programvaren åpner for mulighet av kalkulering av varmebalanse hensyntatt stråle- og konveksjonseffekter for beregning av overflatetemperatur, termisk komfort og kondenseringsrisiko. Her gjelder det også at beregningene kan gjøres dynamisk, time for time, eller med intervall etter eget ønske. Energyplus inkluderer avanserte styringssystemer for vindus-skjerming, illuminansberegning og blendingsberegninger for lysstyring og en rekke VVS-tekniske installasjoner (Energyplus, u.d.-a).

2.4.3 IDA ICE

Programvaren IDA ICE er et avansert program for bygningssimulering. Det gir stor brukerfrihet med hensyn på styring, valg av materialer, struktur i bygningsmasse og valg av tekniske systemer. IDA ICE muliggjør, i likhet med Energyplus, bruk av klimafilet for bygningssimulering ved ulike lokasjoner. Beregningene er dynamiske og modeller i IDA ICE reflekterer det siste innen forskning og inneholder de beste modellene tilgjengelig. De simulerte resultatene samsvarer med målte data ifølge EQUA. Det finnes en rekke programtillegg i IDA ICE, blant annet for simulering av avanserte grunnvarmesystemer, dagslysberegninger og numerisk fluiddynamikk (EQUA, u.d.).

2.4.4 GenOpt – Generic Optimization Program

GenOpt er en programvare for optimalisering for minimering av en kostnadsfunksjon som evalueres av et eksternt simuleringsprogram som EnergyPlus eller IDA ICE. Programvaren er utviklet for optimaliseringsproblemer der kostnadsfunksjonen er særlig krevende og tillater optimalisering av én variabel, (*singe objective optimization*). GenOpt kan benyttes sammen med simuleringsprogram som leser input fra tekstfiler og skriver resultater til tekstfiler. De avhengige variablene kan være kontinuerlige eller diskrete variabler, og resultatene kan presenteres i grafer (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016).

2.4.5 MOBO – Multi Objective Building Optimization

MOBO er utviklet gjennom prosjektet "Optimal Multi-Objective Design of Integrated Renewable Energy Systems and Buildings" finansiert av Academy of Finland. Programvaren gir mulighet for å optimalisere flere enn én variabel (*multi objective optimization*) og kan behandle både kontinuerlige og diskrete variable. Brukeren kan definere egen input ved bruk av algebra og standardsymboler. MOBO tillater parallell simulering (for redusert simuleringstid) og muliggjør presentasjon av resultater i form av grafer. MOBO er i skrivende stund ikke kompatibel med IDA ICE (IBPSA-NORDIC, u.d.).

2.4.6 Powerhouse Kjørbo

Powerhouse Kjørbo er Norges første plusshus og er sertifisert til BREAM-Outstanding, i tillegg til å være verdens første rehabiliterte plusshus. Powerhouse Kjørbo ligger i Sandvika, Bærum og har et bruttoareal på omtrent $5200m^2$ fordelt på to bygninger à tre etasjer. I senere tid har flere blokker tilkommet under navnet Powerhouse Kjørbo, men disse er tilknyttet en annen energisentral enn de to bygningene som betraktes i denne oppgaven. I tråd med Powerhousekonseptet skal Powerhouse Kjørbo produsere mer energi enn forbrukt til bygging, drift og vedlikehold i løpet av 60 år. Dette gjøres blant annet ved hjelp av energibesparende tiltak som isolasjon, unyttelse av termisk masse, lavt energiforbruk til oppvarming ved hjelp av varmpumper og produksjon av elektrisk strøm med solcellepaneler. Powerhouse Kjørbo er tilknyttet fjernvarme som benyttes ved behov. De tekniske systemene ved Powerhouse Kjørbo er prosjektert av Asplan Viak, som også er en av leietakerne i Kjørboparkens lokaler. Varme- og kjøleanlegget for byggene 4 og 5 er ”skreddersydd” for å dekke byggenes energibehov, men samtidig holde energibruken lav i tråd med Powerhouse-konseptet.

Til forskjell fra typiske anlegg finner vi ved energisentralen i bygning 4, at varmebærer iblandet etanol (HX35) føres helt inn til ventilasjonsaggregater for kjøling. Vanligvis vil man ha en varmeveksler mellom primær- og sekundærside, slik at man kan ha vann i sekundærsiden som strømmes til og fra ventilasjonsaggregatet. På den måten sikrer man god kvalitet på væsken med hensyn på materialene i anlegget, for å unngå korrosjon og andre uønskede prosesser. Etersom det er ønskelig å utnytte så mye som mulig av kjølebehovet med frikjøling, fant man i prosjekteringsfasen ut at en varmeveksler ville ført til 2-3 °C høyere turtemperatur til kjølebatteriene i ventilasjonsaggregatene. Dermed ville man ikke fått stor nok kjøleeffekt uten å kjøre varmpumpen som kjølemaskin på sommertid. Likevel er det lagt opp til drift av varmpumpen som kjølemaskin, men det har hittil ikke vært brukt.

3 Metode

Store deler av denne oppgaven hviler på modellen av de tekniske systemene. Modellen er laget i EQUAs programvare IDA ICE med tilleggspakke for borehullsinstallasjon. Valget på simuleringsverktøy falt på IDA ICE ettersom det var delvis kjent fra tidligere i studieløpet. IDA ICE dekker også de behov som foreligger for å løse denne oppgaven på en god måte. Programvaren muliggjør oppsett av egendefinert bygningskonstruksjon på en enkel måte. Dette er en fordel da tilgjengelige modeller av bygninger ofte inneholder feil og mangler som påvirker simuleringsresultater. Det ligger også en trygghet i valg av denne programvaren da veiledere har erfaring med bruk av IDA ICE, noe som gir en fordel ved drøfting av muligheter og løsninger. Da det er ønskelig å synliggjøre ulike parameteres innvirkning på energi og effekt i bygningsmassen og brønnparken, benyttes GenOpt sammen med IDA ICE for å finne optimale verdier for parameterstørrelser og belyse forskjeller mellom referanseanlegg og optimalisert anlegg.

3.1 Referansesystem

Til valideringsformål er Powerhouse Kjørbos grunnvarmesystem benyttet som referansesystem. Der er ikke bygningsmassen implementert i simuleringsmodellen, men bare de tekniske systemene tilknyttet kald side av energiforsyningen. Borehull og pumper er inkludert for validering med hensyn på varmbærerens temperatur ut fra borehullet og termisk effekt i brønnparken.

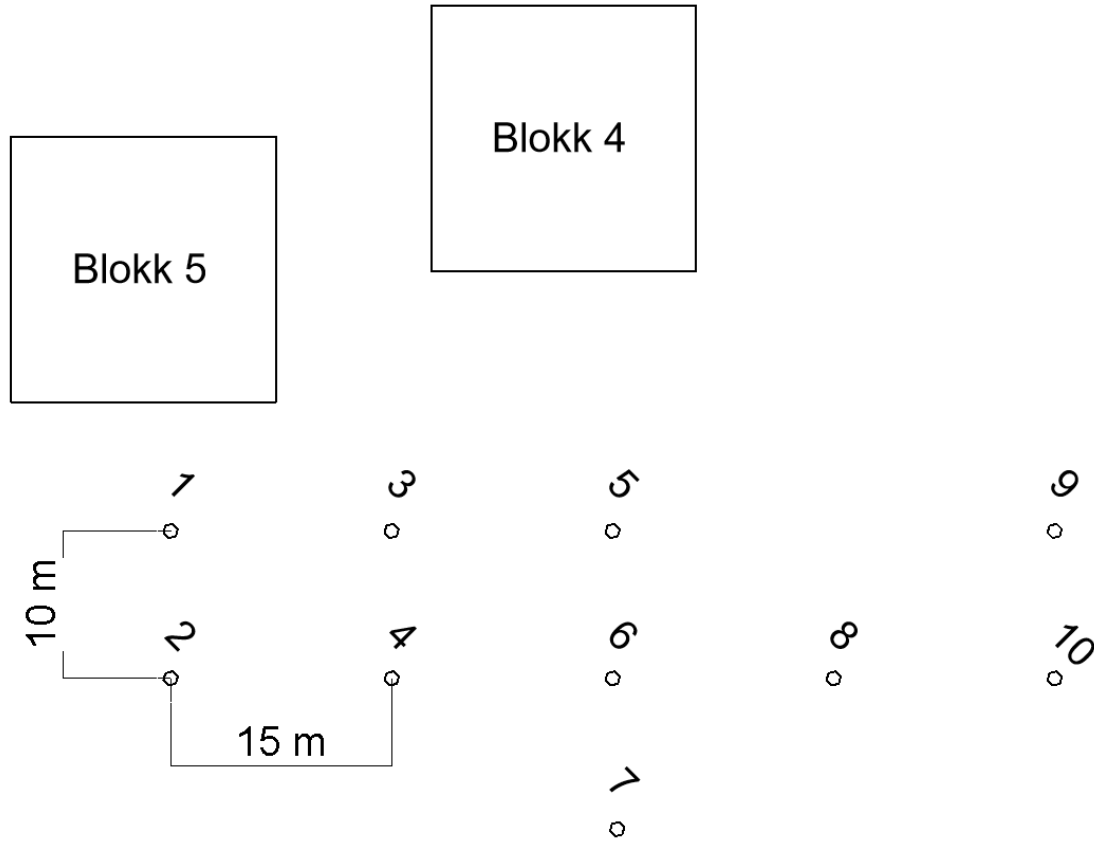
I energisentralen ved Powerhouse Kjørbo er det installert to varmepumper, ulike typer til ulike formål. Varmepumpen som står rom romoppvarming til radiator- og ventilasjonskurser samt kjøling, er av typen Carrier 61WG 070. Varmeytelsen er på 76,1 kW ved nominelle forhold. Varmepumpen benytter arbeidsmediet R410a og har en COP på 4,35 Carrier (u.d.). Nominelle forhold er som følger:

- Kald side:
 - $T_{inn} = 6^{\circ}C$
 - $T_{out} = 3^{\circ}C$
 - Varmebærer: vann
 - *Frysepunkt* : $0^{\circ}C$
- Varm side:
 - $T_{inn} = 35^{\circ}C$
 - $T_{ut} = 45^{\circ}C$
 - Varmebærer: vann

Den etanolbaserte frostvæskeblandingen HX35 er brukt som varmbærer på kald side av grunnvarmesystemet ved Powerhouse Kjørbo.

For tappevannsoppvarming benyttes en varmepumpe av typen NIBE F1145-10. Denne har en varmeytelse på 8,5 kW i følge installasjonsdokumentasjon. Varmeytelsen gjelder ved temperatu-
rene $0^{\circ}C/4^{\circ}C$ på kald side og $50^{\circ}C/40^{\circ}C$ på varm side. Varmepumpen bruker medium R407C. Dette er en bergvarmepumpe som henter varme fra de samme brønnene som varmepumpen for rom- og ventilasjonsvarme.

Brønnparken som forsyner bygningene 4 og 5 ved Kjørbo-parken består av ti brønner á 225 meter. Hullene har en diameter på 115cm og føringsrør for hvert hull er på 6 m. Dette gjelder alle hull bortsett fra hull 6 som har 9 m føringsrør. Borehullenes plassering er gitt av Figur 6.



Figur 6: Borehullenes plassering.

Av Figur 6 ser man en inkonsekvens i plasseringen av borehullene, ved at hull nr. 7 er plassert utenfor de to definerte radene. Det kommer av at brønnen som opprinnelig skulle ligge mellom hullene 5 og 9 kollapset under boring. Dermed ble en ny brønn boret utenfor de to rekkene. Brønnparken ved Powerhouse Kjørbo benyttes som referansesystem gjennom denne oppgaven. For valideringsformål benyttes borehullsplassering som beskrevet i Figur 6, slik at sammenlikningsgrunnlaget er likt. For sensitivitetsanalyser og optimalisering benyttes opprinnelig planlagt borehullsplassering med avstander som vist i Figur 6.

3.1.1 Inndata

Implementerte verdier for borehullsmodellen er gitt i Tabell 1.

Tabell 1: Inndata – borehull.

Parameter	Beskrivelse	Verdi	Referanse
ZHOLE [m]	Borehullenes dybde	219	Brønnskjema
RHOLE [m]	Borehullenes radius	0,0575	Brønnskjema
LCASING [m]	Føringsrør	6	Brønnskjema
NHOLE [-]	Antall borehull	10	Brønnskjema
NPIPE [-]	Antall kollektorrør pr. borehull	1	Brønnskjema
RPIPE [m]	Kollektorrørets radius	0.016	Engineering Toolbox (2006)
THICKPIPE [m]	Kollektorrørets tykkelse	0.024	Pipeline (u.d.)
PLASSERING (x,y)	Borehullenes plassering	iht. Figur 6	Brønnskjema
CPSURFLAY [J/(kgK)]	Overflatens varmekapasitet	1140	Engineering Toolbox (2003a)
LAMBDA [W/(mK)]	Overflatens konduktivitet	0,75	Engineering Toolbox (2003b)
RHOSURFLAY [kg/m3]	Overflatens tetthet	1680	Engineering Toolbox (2010)
CPGRD [J/(kgK)]	Grunnens varmekapasitet	920	Compnature (u.d.)
LAMBGRD [W/(mK)]	Grunnens konduktivitet	2,25	Pasquale et al. (2014)
RHOGRD [kg/m3]	Grunnens tetthet	2880	Compnature (u.d.)
TMEAN [C]	Temperatur i grunnen	$\theta_m + 2^\circ C$	Norges geologiske undersøkelse (u.d.)
GEOTGRAD [C/m]	Geotermisk temperaturgradient	0,02	Norges geologiske undersøkelse (2015)
CPPPIPE [J/(kgK)]	Kollektorrørets varmekapasitet	930	Chang & Bestul (1973)
LAMBPIPE [W/(mK)]	Kollektorrørets konduktivitet	0,41	Engineering Toolbox (2003c)
EPSILON [m]	Kollektorrørets ruhet	1,524E-06	Pipeflow (u.d.)
CPGROUT [J/(kgK)]	Fyllmassens varmekapasitet	420	Engineering Toolbox (2004)
LAMBGROUT [W/(mK)]	Fyllmassens konduktivitet	0,6	Engineering Toolbox (2018)
RHOGROUT [kg/m3]	Fyllmassens tetthet	1000	Engineering Toolbox (2003d)
LIQTYPE [-]	Type varmebærer	Etanol	Brønnskjema
TFREEZE [C]	Varmebærerens frysetemperatur	-17	Båsum boring AS (u.d.)
LAMBLIQ [W/(mK)]	Varmebærerens konduktivitet	0,41	Melinder (2007)

θ_m : Årsmiddel lufttemperatur [$^\circ C$]

Ytterligere verdier for bestemmelse av varmemotstand må implementeres. Her finnes to muligheter: legge inn verdier for målte resultater fra en termisk responstest eller oppgi varmemotstand mellom borehullets bestanddeler.

Ved bruk av resultater fra termisk responstest implementeres verdier for massestrøm, temperatur på væskestrøm til og fra borehullet man tester, samt kalkulert termisk motstand for borehullet. Dette er verdier som finnes i rapport fra testing av borehull ved Powerhouse Kjørbo. Det ser ut til at det foreligger en feil i programvaren, da verdien for termisk motstand tolkes som dimensjonsløs, og forsøk på implementering av verdi for termisk motstand øker simuleringstid drastisk og gir resultater uforenelig med virkeligheten.

Alternativet blir da å beregne termisk motstand mellom borehullets ulike bestanddeler. Disse beregnes etter formel 5. Varmemotstanden for de aktuelle bestanddelene summeres for å finne total motstand.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (5)$$

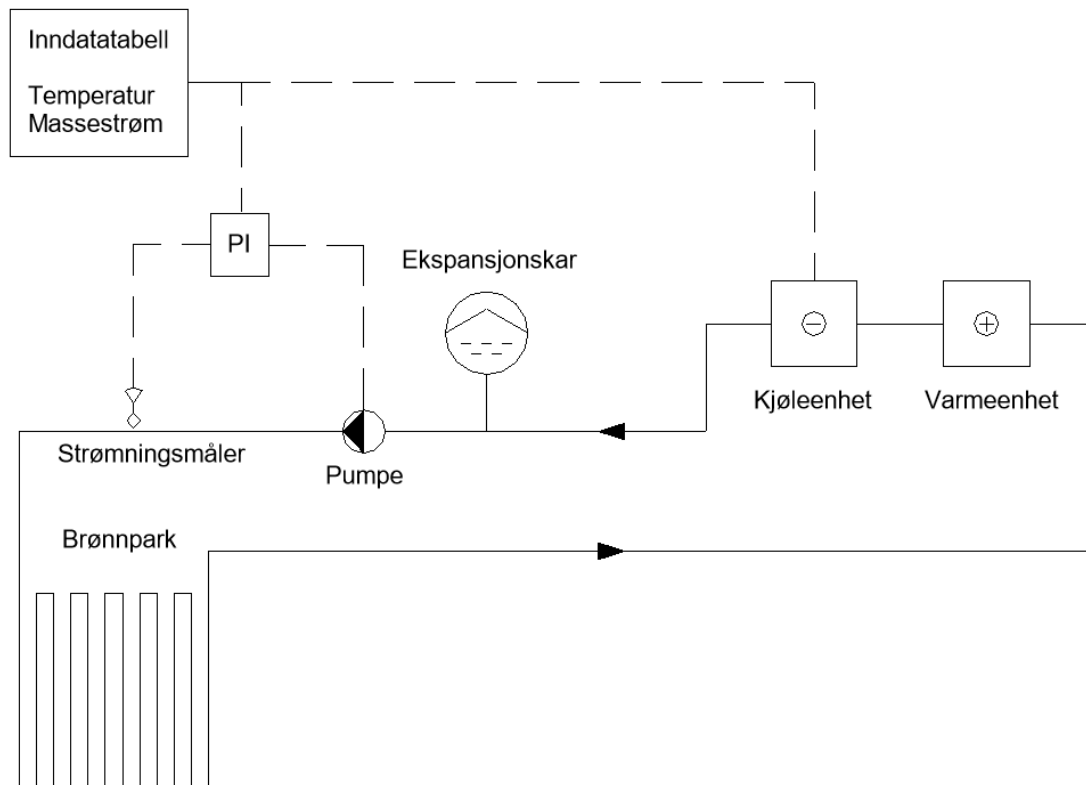
Hvor:

- R er borehullsmotstand
- d er bestanddelens tykkelse
- λ er bestanddelens materiales termiske konduktivitet

Gjennom visuell programmering i IDA ICE lages en modell for validering av borehullstillegget. Valideringen er gjort ved å sammenlikne simulerte og målte resultater for temperatur på mediet ut av brønnparken og termisk effekt i grunnen. Dette gjøres ved å kontrollere type medium og mediets massestrøm, trykk og temperatur inn til borehullene. Simulerte resultater for massestrømmens temperatur ut fra borehullene og termisk effekt kontrolleres så mot målte verdier. Figur 7 viser illustrasjon av modell med tilhørende komponenter som brukes til validering.

Modellen for validering inneholder komponentene:

- Boreull (boreholes)
- Varmeenhet (boiler)
- Kjøleenhet (chiller)
- Sirkulasjonspumpe (free supply circuit control)
- Ekspansjonskar (expansion vessel)



Figur 7: Systemskjema for valideringsmodell.

Figur 7 viser pumpen som sørger for sirkulasjon i varmebæreren (etanol-blanding) gjennom brønnparken. Fra brønnparkens utgang går varmebæreren inn til en kjel før den går gjennom en kjøler og oppnår temperatur gitt av tilkoblet tabell. Kjøle- og varmeanhet har konstant styrings-signal lik 1, hvilket betyr at dem til enhver tid er påslått. Til PI-regulator sendes settpunktssignal

for massestrøm fra inndatatabell. Pumpeenheten mottar styringssignal for å holde målt massestrøm på settpunktverdi. Brønnmodellen i IDA ICE har inndataverdi for uteluftas temperatur for å beregne temperatur i grunnen og ved overflaten. I borehullsmodellen må gjennomsnittlig temperatur i grunnen samt en temperaturgradient oppgis. Disse implementeres som forklart i delkapittel 3.1.

Den styrende komponenten for temperatur på massestrøm til brønnparken er i denne modellen er en *Chiller*. Denne komponenten har høy nok kjøleeffekt (9999kW) til at all væsken gjennom den oppnår settpunkttemperaturene som kommer fra tabellen. En varmeenhet plasseres oppstrøms kjøleenheten plasseres en varmeenhet, som benyttes for å omgå kjøleenhetens begrensinger. Der-som man slipper væske inn på kjøleenheten som har lavere temperatur enn settpunktet, vil ikke riktig temperatur oppnås, og man får feil temperatur på væskestrømmen til brønnparken i forhold til settpunkt. For å sikre at kjøleenheten alltid er på og alltid kjøler ned til riktig temperatur, benyttes varmeenheten for å holde væskens temperatur over settpunkt for kjøling. Varmeeneheten har et settpunkttemperatur på 70 °C og varmeeffekt på 8888kW, hvilket er nok for å heve væskens temperatur over settpunkttemperatur til enhver tid i simuleringstiden.

Inndata for varmepumpemodellen som benyttes i samtlige simuleringer i denne oppgaven er implementert i henhold til datablad for varmepumpen som benyttes til romoppvarming ved Powerhouse Kjørbo. Dette markerer en av forskjellene ved simuleringmodellen og den virkelige energisentralen, ettersom hele dekningen av varmebehov (inkl. varmt tappevann) dekkes av én varmepumpe i modellen. Dette gjøres for å redusere arbeidsmengden og simuleringstiden det ville medført å ha flere varmepumper i modellen.

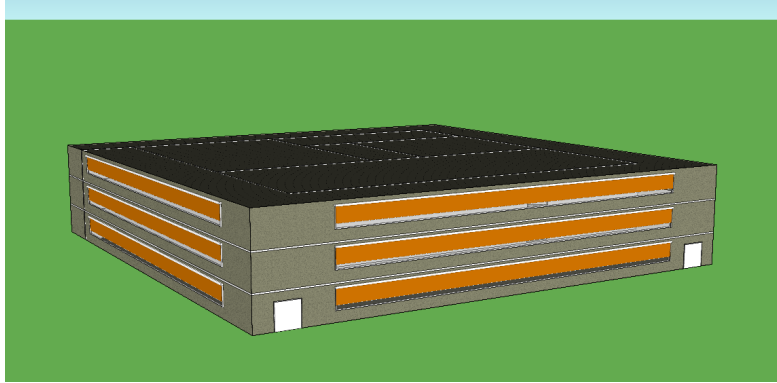
Data logges hvert femte minutt ved Powerhouse Kjørbo, og denne oppløsningen kan ikke endres i SD-anlegget. Dermed ble data eksportert til regneark og bearbeidet til timesverdier. Inndata for simulering ble arrangert i tabellfunksjon i IDA ICE. På grunn av begrensninger i programvaren, tillates ikke antall verdier pr. tabell å overstige 997 linjer. Dermed ble det besluttet å benytte gjennomsnittsverdier for inndata. For å ikke overstige 997 linjer med data, men samtidig benytte en enkel intuitiv inndeling ble gjennomsnittsverdier pr. time benyttet.

På grunn av manglende punkter i data fra SD-anlegget, og programvarens manglende evne til å gjenkjenne tomme celleverdier, gikk mye tid med for å finne hvilke målepunkter som manglet. Ved sammenlikning av målte og simulerte verdier skal dette gjøres ved samme tidspunkt. Dermed ble det nødvendig å lokalisere manglende punkter i datasettene og forhindre forskyvning, slik at tilsvarende tidspunkter kunne sammenliknes for validering. Det følger at perioder som mangler målepunkter utgjør feilkilder.

For å kunne lime ferdigbehandlet data inn i tabell-funksjonen i IDA ICE, må den ha kompatibelt format. Dermed ble data kopiert fra regneark til programvaren *Notatblokk* i MS Windows. Data kopieres fra notatblokk til tabellfunksjon i IDA ICE. Deretter starter simuleringene for validering, hvorpå man for endring av simulert periode må definere ny simuleringstid og tilkoble riktige inn-data for temperaturdata til styrende komponent. Dette er tidkrevende arbeid som med fordel kunne vært forenklet dersom programvaren hadde tillatt tilstrekkelig antall punkter i tabell-funksjonen.

3.2 Referansebygg

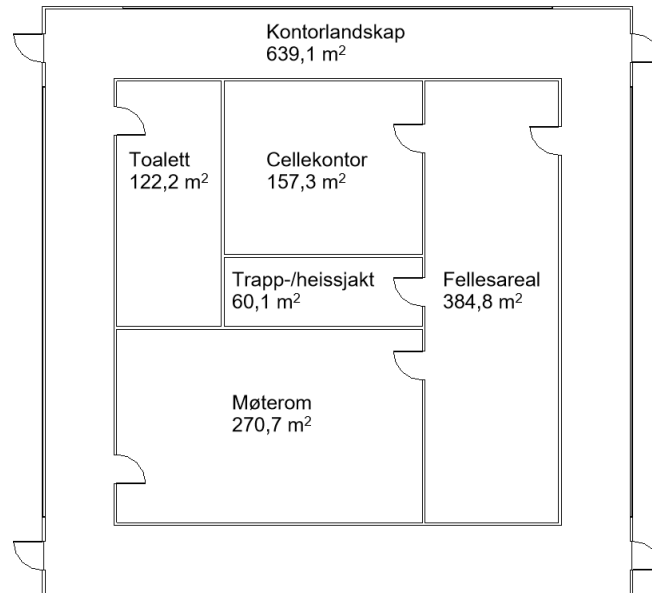
For sensitivetsanalyse og parametrisk analyse (optimalisering) benyttes et referansebygg. Bygningen innfrir krav til passivhusstandard i henhold til NS 3701 og har et bruksareal (BRA) på 4903 m^2 . Energiberegninger for bygget utføres i henhold til NS 3031 som beskrevet i TEK17. Utklipp av bygningsmodellen er vist i Figur 8.



Figur 8: Illustrasjon av referansebygg.

3.2.1 Inndata

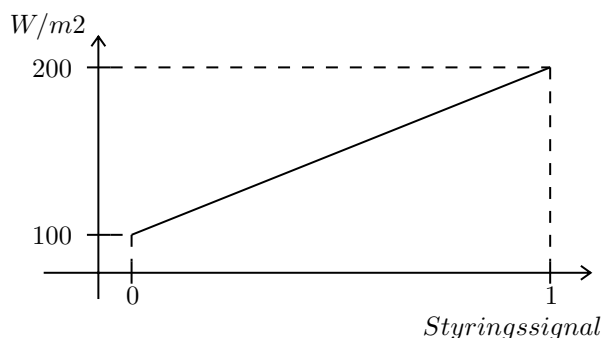
Alle utvendige dører og vinduer betraktes som alltid lukket. Hver etasje har lik planløsning som vist i Figur 9.



Figur 9: Planløsning for referansebygg.

Planløsningen er lik for alle byggets etasjer. Arealene som betraktes som primærareal er kontorlandskap, cellekontor og møterom. Resterende betraktes som sekundærareal. Referansebygget er frittstående og skjermes ikke av objekter utendørs. Ved simulering av reelle bygninger bør omliggende objekter medregnes da de kan påvirke blant annet temperatur og energibruk i bygningen som følger av for eksempel skyggekastning.

Solskjerming for vinduene styres etter en proporsjonalkontroller som styrer av- og påsignal etter grenseverdier for varme vinduene bestråles med. Ved 200 W/m^2 dekker solskjermingen hele vinduet, ved 100 W/m^2 er solskjermingen helt opptrukket og dekker ikke vindusflaten. Proporsjonalstyring innebærer at bestråling mellom grenseverdiene gir et styringssignal proporsjonalt til måleverdi, altså tilsvarer styringssignalet for solskjermingen mengden varmestråling som tilkommer vinduet. Se Figur 10 for visuell forklaring.



Figur 10: Styring for solskjerming.

For beregninger av gjennomsnittlig luftmengde ved behovsstyring forutsettes det at minste primærareal tilsvarer 65% av totalt areal, og største sekundærareal gis en andel på 35% (gitt av NS 3031, Tabell H.2). I modellen utgjør sekundærarealene følgende andel:

$$\frac{A_{\text{kontorlandskap}} + A_{\text{cellekontor}} + A_{\text{møterom}}}{A_{\text{primær}} + A_{\text{sekundær}}} = \frac{639,1\text{m}^2 + 157,3\text{m}^2 + 270,7\text{m}^2}{639,1\text{m}^2 + 157,3\text{m}^2 + 270,7\text{m}^2 + 122,2\text{m}^2 + 384,8\text{m}^2 + 60,1\text{m}^2} = 0,65$$

hvilket fører til at andelen sekundærareal blir $1 - 0,65 = 0,35$. Altså er forutsetningene i NS 3031, Tabell H.2 tilfredsstillt.

Implementerte verdier vist i Tabell 2 gir energibehov til oppvarming og kjøling i henhold til standard for passivhus NS 3701. Beregning av krav til høyeste netto spesifikt energibehov til oppvarming og kjøling i bygningen starter i NS 3701, kapittel 4. Her finner man krav til høyeste tillatte varmetapstall for transmisjons- og infiltrasjonstap for bygninger der oppvarmet del av BRA er over 1000m^2 . For kontorbygning gjelder $H''_{tr,inf,0} = 0,4\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, dette implementeres direkte i IDA ICE.

Ifølge NS 3701 skal energibehov til oppvarming og kjøling beregnes etter NS 3031 med representative klimadata for aktuelt sted. Verdier for varmetilskudd fra belysning, utstyr og personer gitt i kapittel 4.4 i NS 3701 og tillegg A.1 skal benyttes (A.1 henviser til A.2 for areal- og persontetthetverdier og til A.4 for driftstider):

- $LENI = 12,5(kWh)/(m^2 \cdot \text{år})$
- Primærareal = 65%
- Sekundærareal = 35%
- Persontetthet for primærareal = $5m^2/person$
- Tilstedeværelse primærareal = 60%

Verdiene i Tabell 2 er benyttet i simulering. Gjennom simulering beregnes netto energibehov til oppvarming og kjøling for samsvar med passivhuskrav.

Tabell 2: Inndata – referansebygg.

Parameter	Måleenhet	Verdi	Referanse
Tilluftstemperatur	$^{\circ}C$	16	
Tilluftsmengde utenfor driftstid	$l/(s \cdot m^2)$	0,7	Veil. 444 (Arbeidstilsynet, 2016)
Tilluftsmengde i driftstid	$l/(s \cdot m^2)$	2,1	Veil. 444 (Arbeidstilsynet, 2016)
Driftstid	-	5/12/52	NS 3031, Tabell A.3
Tilstedeværelse primærareal	-	0,60	NS 3701, Tabell A.1
Varmetilskudd fra utstyr	W/m^2	6	NS 3701, Tabell A.3
Varmetilskudd fra personer	W/m^2	4	NS 3701, Tabell A.3
Persontetthet, primærareal	$m^2/person$	5	NS 3701, Tabell A.1
U-verdi (yttervegg/tak/gulv)	$W/(m^2 \cdot K)$	0,1 / 0,08 / 0,08	NS 3701, Tillegg B
U-verdi (dør/vindu)	$W/(m^2 \cdot K)$	0,8 / 0,8	NS 3701, Tabell 9
Normalisert kuldebroverdi	$W/(m^2 \cdot K)$	0,03	NS 3701, Tabell 9
Virkningsgrad gjenvinner	-	0,83	NS 3701, Tabell 9
SFP	$kW/(m^3/s)$	1	NS 3701, Tabell 9
Lekkasjetall, n50	h^{-1}	0,6	NS 3701, Tabell 9
Varmetapstall, $H''_{tr,inf}$	$W/(m^2 \cdot K)$	0,4	NS 3701, Tabell 3
Minste andel primærareal	-	65%	NS 3031, Tabell H.2
Største andel sekundærareal	-	35%	NS 3031, Tabell H.2

Unntaket for parameterne satt i Tabell 2 gjelder for sekundærarealer. Disse arealene er ikke beregnet for varig opphold og ventileres dermed bare for materialeemisjon, $0,7l/(s \cdot m^2)$ både i og utenfor driftstid. Ved bruk av angitt luftmengde utenfor driftstid forutsettes bruk av dokumentert lavemitterende materialer i henhold til Arbeidstilsynets veiledning 444.

For varmetilskudd fra personer regner man med at aktivitetsnivået ligger mellom verdier for skrivning og vandring, gitt av forklaring i IDA ICEs hjelpefunksjon. Her beskrives det at "Typing" og "Office walking" tilsvarer verdier vist i Tabell 3. Verdiene er hentet fra *ASHREA Fundamentals* (2001).

Tabell 3: Aktivitetsnivå og varmetilskudd.

Aktivitet	Aktivitetsnivå [met]	Effekt pr. person [W]
Skriving	1,1	117
Kontorgåing	1,7	180

3.2.2 Varmebehov

For bygninger hvor oppvarmet del av bruksareal er over $1000m^2$ på steder hvor årsmiddeltemperaturen $\theta_{ym} < 6,3^\circ C$ gjelder Likning 6 for krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming:

$$E = EP_{H,0} + K_1(6,3 - \theta_{ym}) \quad (6)$$

Hvor:

- E er netto spesifikt energibehov [kWh/m^2]
- $EP_{H,0}$ er basis netto spesifikt oppvarmingsbehov [$kWh/(m^2 \cdot \text{år})$]
- K_1 er klimakoeffisient for oppvarmingsbehov [$kWh/(m^2 \cdot \text{år} \cdot ^\circ C)$]
- θ_{ym} er årsmiddeltemperatur [$^\circ C$]

Verdiene for faktorene $EP_{H,0}$ og K_1 er gitt i Tabell 5 i NS 3701:

- $EP_{H,0} = 20 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}$
- $K_1 = 3,6 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år} \cdot ^\circ C}$

For steder hvor årsmiddeltemperaturen $\theta_{ym} > 6,3^\circ C$ gjelder det at $EP_{H,0}$ er krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming.

3.2.3 Kjølebehov

For beregning av krav til høyeste netto spesifikt energibehov til kjøling gjelder Likning 7:

$$Q_C = \beta(DUT_s - 20) \quad (7)$$

Hvor:

- β er kjølebehovskoeffisient avhengig av bygningskategori gitt i NS 3701 (Tabell 7).
- DUT_s er dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold som i gjennomsnitt ikke overskrides med mer enn 50 timer i året

Verdiene for faktorene β og DUT_s brukt i Likning 7, er hentet fra henholdsvis Tabell 7 i NS 3701 og Underlagsrapport for NS3701 (2011). Kjølebehovskoeffisienten β er $1,4kWh/(m^2 \cdot \text{år} \cdot ^\circ C)$ for passivhus kontorbygninger.

Med årsmiddeltemperaturer gitt i Byggforsk 451.021 er krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming for valgte steder som gitt i Tabell 4:

Tabell 4: Energikrav – passivhus.

Sted	Krav til netto spesifikt energibehov [$kWh/m^2 \cdot \text{år}$]	
	Oppvarming	Kjøling
Oslo	20,72	9,38
Tromsø	32,96	2,1
Stavanger	20	4,48

For hver lokasjon undersøkes det at bygget innfrir krav til energibehov.

3.3 IDA ICE

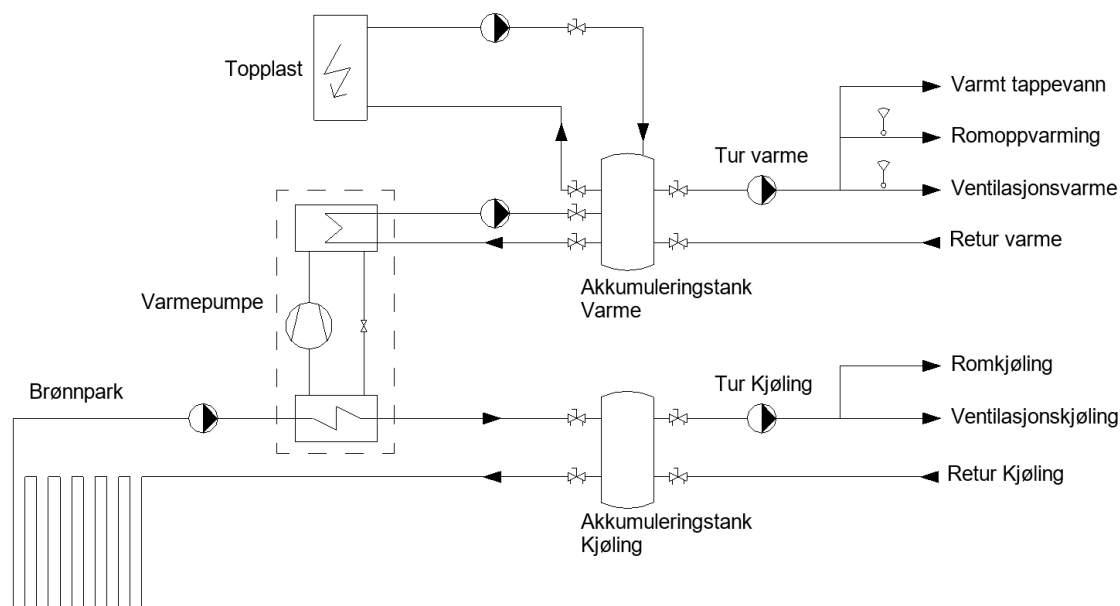
IDA ICE (Indoor Climate and Energy) er programvare for simulering av innendørs klima og energi. Dette er et nyttig verktøy for å beregne energiforbruk i et tidlig byggestadie og kan blant annet benyttes for å beregne energiforbruk for sammenlikning mot forskriftskrav og standarder. Programvaren kan benyttes for å studere individuelle soner i bygg, såvel som hele bygningskroppen. Simuleringer gjennomføres i sammenheng med klimafilere fra IWEC 2. IDA ICE tillater å konstruere egne kontrollere for styring, bygge egne materialsjikt, definere geometri og å sette sammen egne tekniske systemer. Det finnes også bibliotek med predefinerte enheter, slik at man slipper å konstruere slike selv. En slik frihet i programvaren betyr i prinsippet at brukeren kan simulere et hvilket som helst system ved hjelp av IDA ICE. Informasjon for beskrivelse av komponenter og systemer i dette delkapittelet er innhentet fra egne erfaringer og av dokumentasjon tilhørende programvaren IDA ICE (EQUA, 2018).

3.3.1 ESBO-anlegg

I utgangspunktet vil en modell i IDA ICE være av et relativt enkelt slag, med én sone, en luftbehandlingsenhet (AHU, Air Handling Unit) og generiske ideelle komponenter for varme og kjøling. For mer avanserte modeller kan man velge å bytte ut disse enkle variantene av systemer. ESBO-anlegg (Early Stage Building Optimization) er et alternativ for implementering av avanserte tekniske systemer. ESBO-varianten i dette prosjektet inneholder:

- Krets for varmegjenvinning til AHU
- Tank for lagring av varmt vann
- Tank for lagring av kaldt vann
- Topplast
- Grunnlast
- Kjølekrets
- Grunnvarmekrets
- Distribusjonssystemer for varme og kjøling

Figur 11 viser et enkelt flytskjema for delen av energianlegget som betraktes i denne oppgaven.



Figur 11: Flytskjema – Energianlegg.

Etter at man har valgt de systemene man ønsker å ha med i bygningssimuleringen, oppdateres grensesnittet og man får innsikt i hvilke komponenter som inngår i de forskjellige systemene. De ulike komponentene er plassert i bokser og gruppert etter systemet de tilhører. Når modellen er bygget, kan man gjøre de endringer man måtte behøve, ved å slette eller legge til komponenter fra biblioteket. Komponentene kobles sammen ved å trekke linjer mellom dem. Dersom en gjør endringer som er umulig for programvaren å behandle matematisk, vises feilmeldinger som kan hjelpe ved feilsøking.

Standard ved implementering av et ESBO-anlegg i IDA ICE er to lagdelte tanker plassert sentralt, en for akkumulering til varmesystemene (øverst) og en for kjølesystemene (nederst). Disse to tankene er uunnværlige for de fleste tekniske systemer for oppvarming og kjøling av bygg. Standard laginndeling i hver tank er 10 lag, men som for de fleste andre parametere kan denne laginndelingen endres. Tankene er initialt utstyrt med ventiler for inn- og uttak, plassert på høyder optimale for å unngå blanding av kaldt og varmt vann i tankene. Tankene er også utstyrt med en shunt for å sikre at returvannet til tankene benyttes først ved pådrag, for å sikre minimal gjennomstrømning i tankene. En slik kobling ønsker man gjerne å ha i virkeligheten for å unngå unødig energibruk. Der tankene ikke er en del av det systemet en ønsker å simulere, kan man sette tankenes volum til nærmet 0. Alternativt kan man slette dem fra modellen, men dette bør gjøres med forsiktighet da det kan medføre feilmeldinger som er vanskelig å tyde og unødig tidsbruk. Ved å sette tankenes volum til nesten 0 kan dem betraktes som rørsystemets akkumuleringsvolum, hvilket kan argumenteres er en reell antakelse.

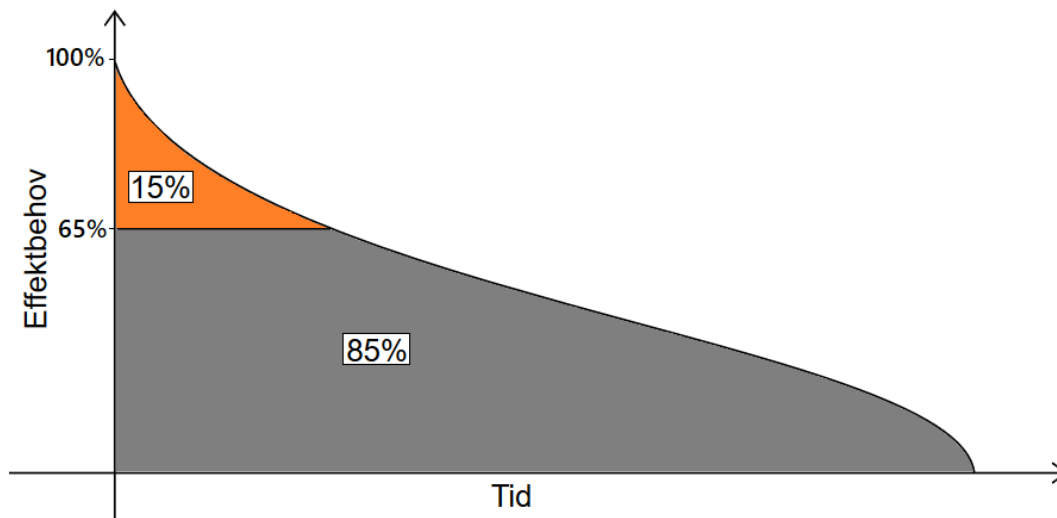
Varmt forbruksvann trekkes direkte fra akkumuleringstanken, basert på innsatte verdier for varmtvannsforbruk. Settpunkttemperaturen for varmtvann settes til 55°C og tilførselen til akkumuleringstanken har temperatur i henhold til valgt klimafil. Det finnes ingen egen bereder for

varmt forbruksvann initialt i ESBO. Dette innebærer en forenkling ved at varmeoverføring til forbruksvannet foregår øyeblikkelig og med uendelig høy effekt.

I ESBO finner man også varmforsyning til ventilasjonsaggregatet. Her finnes også settpunktverdi for forsyningstemperatur samt en av-/på-kontroller som styrer hvorvidt ventilasjonsaggregatet og sonene får tilført varme. For å unngå høy frekvens av innslag fra pådragsorgan er det lagt inn et dødbånd på 3°C , hvilket betyr at man lar temperaturen avvike $1,5^{\circ}\text{C}$ fra settpunkt før man starter og stopper pådraget. Delsystemet for varme til soner har mange likheter med det for ventilasjonsvarme. Her finnes det i tillegg til settpunktstemperaturer også funksjoner som gjør at temperatursettpunktet kan variere med utetemperatur og mulighet for nattsenkning. For kaldt vann til ventilasjonsaggregat og romkjøling er disse koblet til tanken for akkumuleringstanken for kjøling. Initialt er settpunktene for ventilasjons- og romkjøling henholdsvis 5°C og 14°C .

Topplasten (også kalt spisslast) i ESBO-plant fungerer som sikring i perioder med lave utetemperaturer. Spisslasten sørger for at settpunkttemperatur opprettholdes i toppen av akkumuleringstanken. Kontrolleren måler temperatur i toppen av tanken og sørger for pådrag fra topplasten gitt at grunnlasten går på full kapasitet. I ESBO kobles varmepumpens varme side direkte til akkumuleringstanken. En pumpe kontrollert av en PI-kontroller sørger for at tanken fylles slik at fyllingsforholdet når settpunktverdi. Fyllingsforholdet er 1 når alt vannet i tanken er ved settpunkttemperatur, og 0 når alt vannet i tanken er ved 20°C .

Vanligvis dimensjoneres grunnlasten for å dekke en andel av effektbehovet ved dimensjonerende utetemperatur. For å unngå lav effektfaktor ved bruk av varmepumper, bør ikke disse overdimensjoneres. Dersom hele effektbehovet skulle dekkes av en varmepumpe, ville den i store deler av året gått på dellast, hvilket medfører dårlige driftsvilkår for maskinen og lengre inntjeningsperiode for investeringen. Eksempelvis kan en 65% dekningsgrad på effekt bety at grunnlasten dekker 85% av energibehovet. Se Figur 12 for eksempel.



Figur 12: Effekt-varighetskurve – Eksempel.

I Figur 12 representerer det fargede arealet dekning av energibehov. Det oransje arealet angir andelen av energibehovet som må dekkes med spisslast, og det grå representerer energibehov

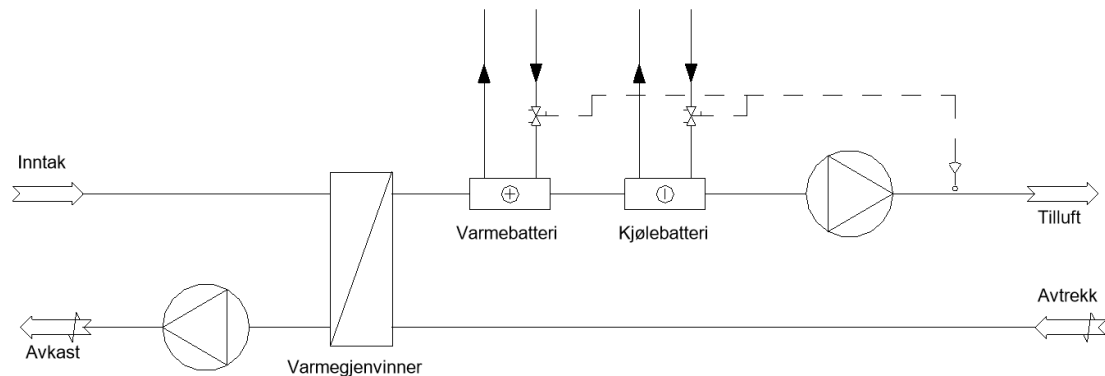
dekket av grunnlast. Grunnlasten er dimensjonert for å dekke 65% av effektbehovet og dekker dermed energi representert av det grå arealet. Man ser at det oransje arealet er betraktelig mindre enn det grå, dermed dekker grunnlasten mesteparten av energibehovet, uten å være overdimensjonert.

På fordampersiden (kald side) er varmpumpen koblet til energibrønn og akkumuleringstank for kaldt vann. Væsken som sirkulerer på kald side er en annen enn vannet som sirkulerer på varm side. Væsken på kald side er typisk frostsikret, og inneholder dermed en eller annen form for frostvæske som etanol eller glykol. Kretsen på kald side forsyner enheter med kjøling etter hvert som pådrag påkalles. Dersom man har varmebehov, vil vann tappes fra varm akkumuleringstank, og har man kjølebehov vil vann tappes fra kald akkumuleringstank. Dersom disse hendelsene skulle skje samtidig må et valg foretas for hvilken av tankene som skal forsynes, men dette antas å skje sjeldent.

Borehullelementet i IDA ICE er i utgangspunktet en enkel utgave som bare tillater simulering av ett enkelt borehull. For å kunne simulere en hel brønnpark benyttes et programvaretillegg for borehull. På grunn av begrensninger ved dette tillegget må ESBO-anlegget endres litt. Innføring av borehullstillegget medfører fjerning av flere komponenter i ESBO-anlegget for å unngå urimelig lang simuleringstid. Samtidig må massestrømmen holdes på et relativt høyt nivå for å unngå lang simuleringstid. EQUA jobber med en løsning for dette. For fungerende oppsett fjernes *decoupler*, *filter* og *pumpcirc* i tilknytning til borehullet. Se vedlegg A for endelig oppsett av ESBO-anlegg.

3.3.2 Luftbehandlingsenhet

Til luftbehandling i bygningskroppen implementeres en luftbehandlingsenhet i IDA ICE. Denne er installert når man starter en ny fil i programvaren. Et enkelt flytdiagram for enheten vises i Figur 13.



Figur 13: Systemskjema – Luftbehandlingsenhet.

I IDA ICE inneholder luftbehandlingsenheten:

- Settpunktkontroller for tilluftstemperatur
- Avtrekksvifte
- Tilluftsvifte
- Varmegjenvinner
- Varme- og kjølebatteri
- Tilluftsvifte
- Timeplan

I programvaren kan man sette verdier for spesifikk vifteeffekt (SFP – *Specific Fan Power*), effektivitet, temperaturløft og dellastytelse ved bruk av variable luftstrømmer. Viftekomponentene har også en timeplan for styring, som er *alltid på*. Dersom styringssignalet settes til 0, vil viftene (av numeriske årsaker) fortsatt gi en trykkøkning, men veldig lav. Timeplanen for viftestyring er også koblet til luftenheter i sonene som stenges når styringssignalet blir 0. Dette gjør at man unngår spontane luftstrømmer gjennom ventilasjonsanlegget som følger av skorsteinseffekt. Viftene opererer med ideell trykkontroll med konstant effektivitet og gitte settpunkter. Dette medfører at viftene forsyner luft med konstant trykk. Både den konstante effektiviteten og det konstante trykket er i sjeldne tilfeller aktuelle å endre på, da begge parametere bare har betydning for kalkulering av strømførbuket til viftene. I viftekomponentene angis også luftas temperaturløft over viftene. Temperaturløftet kan også automatisk beregnes som funksjon av blant annet viftepådrag, men denne funksjonen er ikke betraktet i dette prosjektet.

For modellering av ventilasjonssystemer med konstante luftmengder (CAV – Constant Air Volume) må verdier for trykkløft og effektivitet i viftene settes for normal drift, alternativt kan man sette verdi for SFP (Specific Fan Power). For ventilasjonssystemer med variable luftmengder bør ytelsen tilpasses for luftstrømmer lavere enn de ved normal drift. For dette formålet er ASHRAE Standard 90.1 implementert i viftemodellen, hvilket muliggjør automatisk beregning av ytelse ved lavere luftstrømmer. For variable luftmengder (VAV – Variable Air Volume) må også nominell strømming angis.

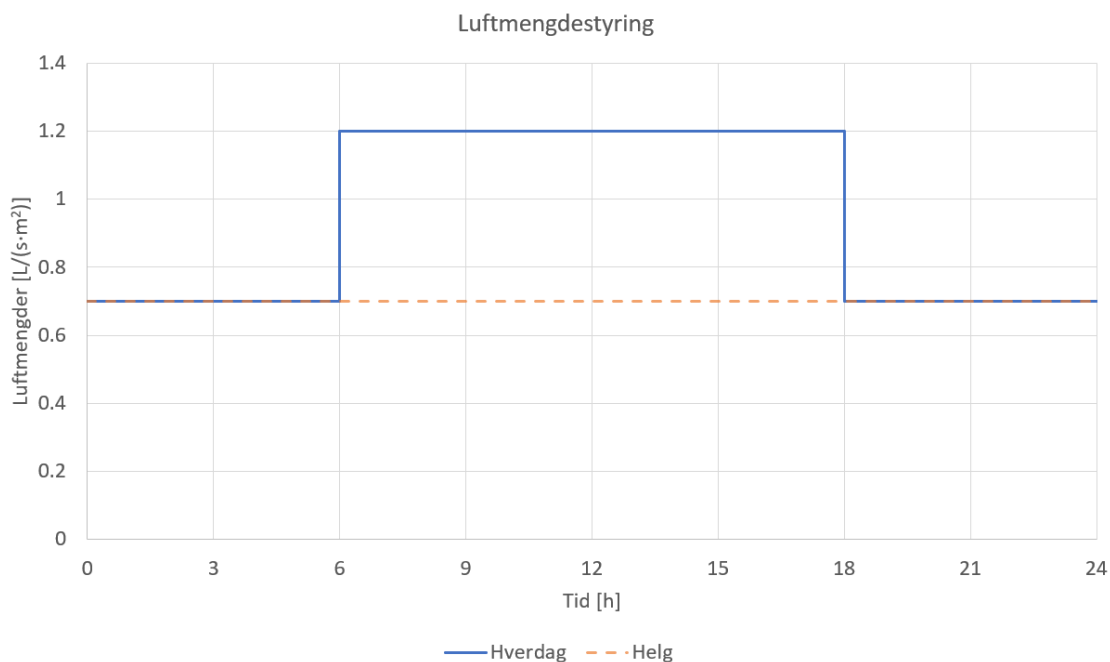
I varmegjenvinneren kan man sette inn effektivitet, kapasitet og minste tillatte temperatur for lufta som forlater enheten (som frostsikring settes denne til 1°C). Varmevekslerens timeplan angir i likhet med den for viftene, at varmeveksleren alltid er fungerende. Varmeveksleren kontrolleres ved å tilpasse effektiviteten til valgt settpunktverdi med hensyn på maksimalt tillatt effektivitet. Enheten tar også hensyn til kondensering på både tilluft- og avtrekkside. Dette medfører bruk av en bypass-faktor for korrigerende av effektivitet for å unngå kondensering. Ved kondensering betraktes effektiviteten som $1 - \text{bypassfaktor}$.

I varme- og kjølebatteriene angis effektivitet og temperaturfall på væsken som strømmer gjennom. Effektiviteten er satt til 1, hvilket betyr uendelig god temperaturtilnærming mellom væske og luft. Dette er i praksis ikke mulig, men holdes på denne verdien i dette prosjektet da det ikke er en del av forskningsområdet. I disse enhetene er det ingen bypass på væskesiden da kontroll oppnås ved struping av væskestrømmen.

I settpunktkontrolleren for tilluftstemperatur kan man velge mellom tre ulike metoder for å styre tilluftstemperaturen: konstant, timeplan eller graf. Man kan også implementere en kurve for ute-temperaturkompensert tilluft. Dette er vanlig for å øke tillufttemperaturen i kalde perioder for

å opprettholde ønsket temperatur innendørs. For dette prosjektet benyttes konstant tilluftstemperatur på 16°C ettersom energikrav imøtekommes med dette. Energimetre er implementert i luftbehandlingsenheten for logging av energibruk.

Luftstrømning i sonene kan foregå på tre måter: tilluftsvifte, avtrekksvifte og gjennom utettheter i bygningskroppen. IDA ICE muliggjør også å hensynta naturlig ventilasjon, men det redegjøres ikke for i dette prosjektet da kun mekanisk ventilasjon anvendes i modellen. I dette prosjektet benyttes en forenklet VAV-variant, hvor luftmengdene styres for å holdes konstante og balanserte i og utenfor driftstid. En slik egendefinert styring vil medføre at luftmengder for tilluft og avtrekk bestemmes av de luftmengdene som angis i sonen, og ikke som funksjon av temperatur, CO_2 , fuktighet eller andre parametere. Figur 14 viser hvordan luftmengdene styres til ulike tider.



Figur 14: Illustrasjon – tilluftsmengder.

I Figur 14 kan man se at tilluftsmengdene er $2.1\text{l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ mellom 06.00 og 18.00 på hverdager og $0.7\text{l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ alle andre tider. Denne styringen implementeres likt i alle soner av primærareal.

3.3.3 Sonemodell

For sonemodeller finnes det to alternativer i IDA ICE, en modell for standard grensesnitt og en for avansert grensesnitt. For modellering av tekniske systemer (Varme, kjøling og ventilasjon) er standard og avansert modell helt like. I manualen redegjøres det likevel for modellene ved hjelp av den avanserte varianten, da fysikken er enklere forklart ved hjelp av den (EQUA, 2018).

For sonemodell finnes variantene *klimamodell* og *energimodell*. Klimamodellen er nokså detaljert og åpner for eksempel for kalkulering av vertikal temperaturgradient i sonen. Til forskjell baseres energimodellen på gjennomsnittlig strålingstemperatur. For dette prosjektet benyttes energimodellen, som også implementeres initialt ved innsetting av ny sone. Enheter i sonene som

radiatorer, kjøleenheter, vinduer og kontrollere er de samme i de to forskjellige modellene.

En av nøkkelfaktorene ved god bygningssimulering er behandlingen av direkte og diffus solstråling. Måten programvaren behandler solstrålingen på kan være avgjørende for resultatene for energibruk i bygningen. Ved avansert grensesnitt beregnes diffus solstrålingsintensitet basert på klarhetsindeks gitt i klimafil. Etter beregning av solstrålingsintensitet kalkuleres solposisjon. Alle utregnede signaler sendes så til er sett av *overflatemodeller*, hvor klimaforhold ved utendørs overflater beregnes. I denne modellen beregnes diffus solstråling initialt ved bruk av Perezs himmelmodell. Ved neste steg kalkuleres solstrålingen på de individuelle objekter som vinduer og vegger. Vindusmodeller innehar en kalkulasjonsmodell for solskjerming som kalkulerer skjerming på bestrålt flate, både diffus og direkte stråling. Dette betyr at nærliggende bygningers, eller andre hindringers skyggelegging av det lysbestrålte objektet hensyntas. Refleksjoner av solstråling kan også påvirke resultater ved energisimulering. I IDA ICE er kun refleksjon fra bakken tatt hensyn til. Diffus stråling fra bakken er ikke skyggelagt av eksterne objekter, og alle utvendige solskjerminger er antatt å ha opake flater.

Det finnes to typer vindusmodeller i IDA ICE, *Standard* og *Detailed*. I dette prosjektet er vinduer av den detaljerte typen benyttet. Denne modellen lager en lag-for-lag kalkulasjon av multiple refleksjoner, og hvert av disse lagenes temperatur beregnes. For glasstyper hvor alle glasslagene og den integrerte skjermingen har spektral informasjon, gjøres den optiske kalkulasjonen i solintervall for hver bølgelengde. Verdiene integreres så til gjennomsnittsvedier i henhold til EN 410¹.

På innsiden av sonen er det diffuse lyset jevnt fordelt, mens det kalkuleres for det eksakte punktet som utsettes for direkte stråling. Hele vinduets overflate betraktes som lyskilde for sonen, og ikke bare den delen av glasset som ikke er skjermet av eksterne objekter. Lysstrålen spres jevnt over rommets flater etter at lysstrålen har truffet den første overflaten. Overflaten som treffes før lyset distribueres jevnt, antas å avgi stråling jevnt over hele flaten, og ikke bare punktet hvor lysstrålen treffer. Vinduer og åpne dører som ikke grenser til utendørs overfører lys på en lik måte som utvendige vinduer gjør. En åpning i en flate innendørs betraktes som belyst, selv om bare en liten del av døren mottar direkte sollys.

3.3.4 Romenheter – varme og kjøling

Romenhetene for varme og kjøling benyttet i dette prosjektet er henholdsvis vannbårne radiatorer og kovektorer. Radiatorene er laget av en matematisk modell som gir dem egenskapen til å ha en posisjon i rommet. Dette muliggjør beregning av stråling i nærheten av radiatoren. Varmeemisjon beregnes etter Formel 8:

$$P = K \cdot l \cdot dT^N \quad (8)$$

Hvor:

- P er varmeeffekt
- l er radiatorens lengde
- dT er temperaturredifferanse mellom vann i radiatoren og romluften
- K og N er konstanter som karakteriserer radiatorer av en viss høyde

¹Standard for glass i bygninger: *Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing*

Størrelsen på radiatorens overflate defineres av boksen som tegnes inn i modellen. Andelen stråling og konveksjon fra radiatoren beregnes ut fra radiatorens overflatetemperatur. Sonen "ser" radiatorens varme overflate og beregner så stråling- og konveksjonsvarme fra overflaten. Mesteparten av varmen overføres konvektivt til romlufta. Bare en liten andel av varmen går bak til veggen radiatoren er "montert" på, denne andelen varme antas overført via stråling. Kjøleenhetene (*fan coils*) fungerer helt likt som de vannbårne radiatorene. De samme reglene gjelder for andel stråling og konvektiv varmeoverføring, samt likning for varmeemisjon.

3.4 Validering

For å kvantifisere hvor høyt potensiale modellen har til å beskrive virkeligheten benyttes korrelasjonskoeffisienten R^2 . Koeffisienten angir andelen av variasjon i simulerte verdier som kan forklares med variasjon i målte verdier. Forklaring av fremgangsmåte er gjort med inspirasjon fra Ringdals bok, Enhet og mangfold (2014).

For å forklare R^2 må flere begreper innføres. Målinger arrangeres i et koordinatsystem, den ene variabelen Y langs y-aksen og den andre variabelen X langs x-aksen. Figur 15 viser en skisse av forklaringen. Figuren er inspirert av Ringdal (2014) s.399.

La gjennomsnittet av verdier langs y-aksen være \bar{Y} og la linjen med forventet sammenheng være L . La så SS_T være differansen mellom målepunkt i variablene langs y-aksen og gjennomsnittet \bar{Y} . Formel for SS_T er gitt av likning 9.

$$SS_T = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

Hvor Y_i er verdi for Y ved tidssteg i .

SS_T (*total sum of squares*) representerer bidraget til den totale kvadratsum langs Y , hvilket angir prediksjonsfeil for denne verdien i variabelen. SS_T kan deles i to, i øvre og nedre del, kalt henholdsvis SS_R (*sum of squares regression*) og SS_M (*sum of squares model*).

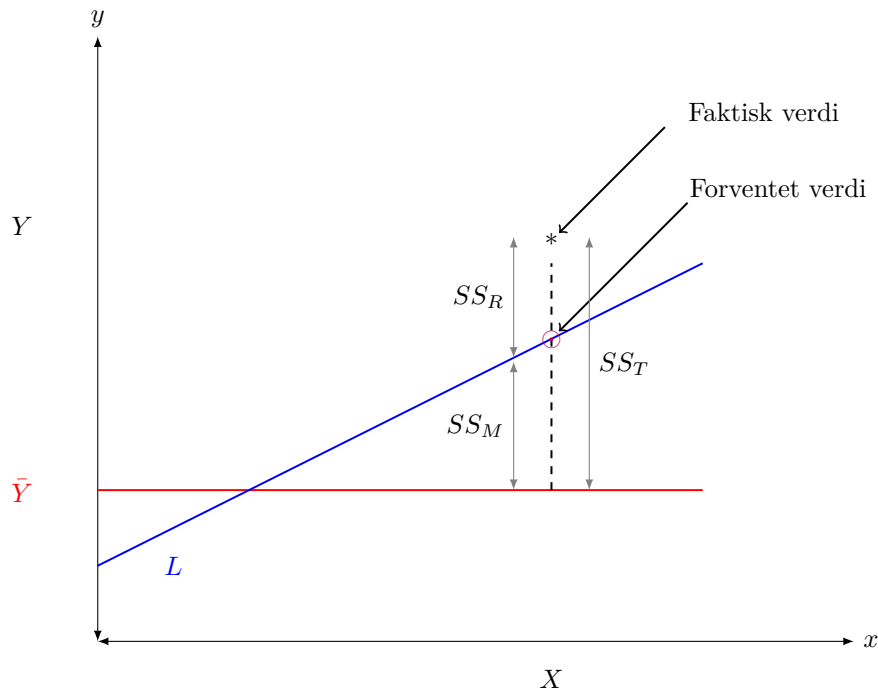
SS_R representerer regresjonens residual (prediksjonsfeil). Denne verdien er gitt av Likning 10.

$$SS_R = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (10)$$

Hvor \hat{Y}_i er forventet verdi for Y ved tidssteg i .

SS_M viser hvor mye prediksjonen forbedres ved å bytte ut \bar{Y} med L for å forutse neste verdi i variabelen. Formel for SS_M er vist i likning 11.

$$SS_M = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (11)$$



Figur 15: Illustrasjon av kvadratsummer.

Av dette følger det at total kvadratsum av Y (SS_T) er lik den forklarte kvadratsummen SS_M summert med residualenes kvadratsum SS_R :

$$SS_T = SS_M + SS_R \quad (12)$$

Definisjonen av SS_T danner så grunnlaget for den *forklarte variansen* i Y av X , R^2 som beskrevet i Likning 13:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_M}{SS_T} \quad (13)$$

Forholdet mellom kvadratsummen SS_M og total kvadratsum SS_T angir andelen variasjon i Y som ikke kan forklares av variasjon i X . Det følger da at når man trekker andelen som *ikke* forklarer variasjon fra 1, vil man få andelen variasjon i Y som kan forklares av variasjon i X .

R^2 vil ha en verdi mellom 0 og 1, hvor 0 indikerer at det ikke er noen sammenheng i variasjon mellom de to undersøkte variablene og 1 indikerer fullstendig sammenheng i variasjon. Mer konkret for dette prosjektet betyr en R^2 nærme 1 at modellen for simuleringer har et godt potensiale for å vise nøyaktige resultater.

Roten av kvadratisk gjennomsnittsavvik ($RMSE$) regnes for å kvantifisere avviket mellom verdier, da en ren aritmetisk betraktning ikke synliggjør det faktiske avviket. $RMSE$ beregnes etter formel 14:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (14)$$

Hvor:

- Y_i er målte verdier ved tidssteg i
- \hat{Y}_i er simulerte verdier ved tidssteg i
- n er antall verdier

Kvadratsummen $RMSE$ (*Root-Mean-Square-Error*) representerer variasjonen, hvor mye spredning som finnes i dataene. Variasjonskoeffisienten for $RMSE$ (CV_{RMSE}) viser hvor godt modellen passer med data. Ved bruk av timeverdier er modellen å anse som kalibrert dersom $CV_{RMSE} < 10\%$ i henhold til ASHREA (2002). Variasjonskoeffisienten er gitt av likning 15:

$$CV_{RMSE} = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \quad (15)$$

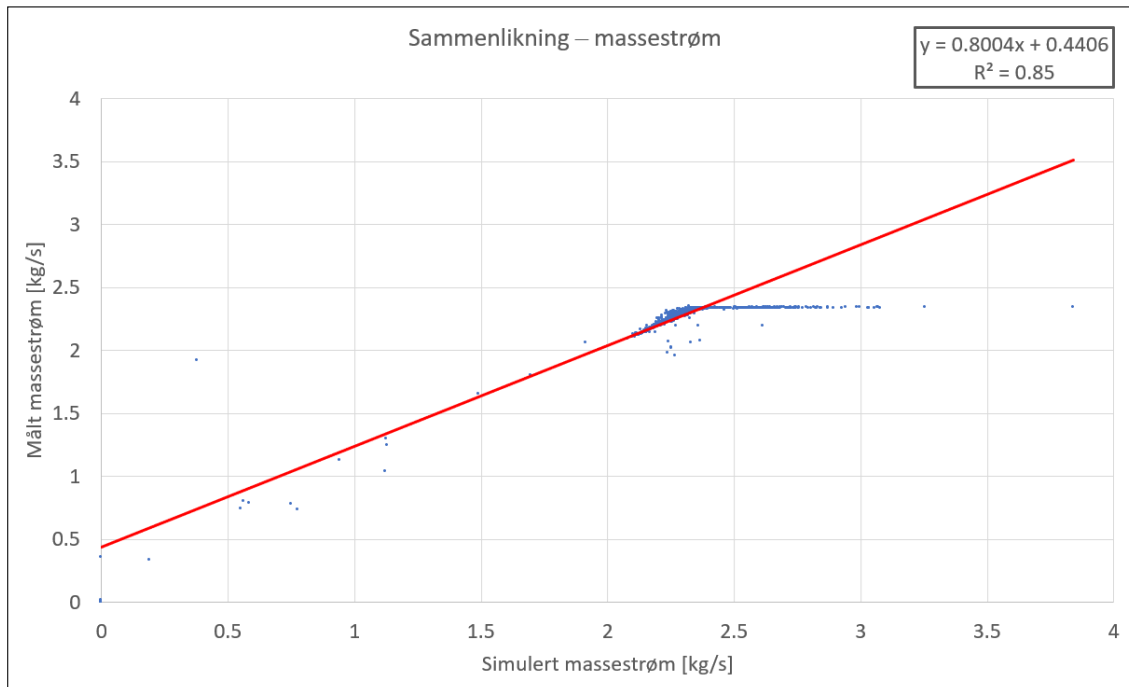
Det gjelder at CV_{RMSE} med lav verdi (nærme 0), indikerer at simulerte og målte verdier stemmer godt overens. En høyere verdi (nærme 1) indikerer liten overensstemmelse (Hong et al., 2016).

For beregning av forklart varians med hensyn på temperatur implementeres målt temperatur i tabell-funksjon i IDA ICE. Den målte temperaturen hentes fra SD-anlegget med målinger hvert femte minutt. IDA ICE setter begrensninger for hvor mange verdier man kan ha i tabellen. Derfor regnes det gjennomsnitt av målingene, slik at temperaturene som benyttes til simulering er timesverdier.

Ved implementering av massestrømmen som benyttes for validering av termisk effekt må en annen fremgangsmåte benyttes enn den for temperatur. I pumpeenheten som er brukt i IDA ICE kan ikke massestrøm som inndata gjengis direkte som utsignal. En regulator må benyttes for å gi et utsignal som samsvarer med ønsket massestrøm. Dette "mellomleddet" fra settpunktverdi til ut-verdi utgjør også en potensiell feilkilde. På samme måte som for temperatur, gjennomsnittsberegnes massestrømmene til timesverdier og legges inn i tabell-funksjon i IDA ICE. For at pumpeenheten skal få et signal som massestrømmen skal justeres etter, benyttes en PI-regulator². I pumpeenheten angis blant annet maksimal og minimal massestrøm, medium og dets frysepunkt samt settpunkt for arbeidstrykk.

²Proporsjonal-integrasjon regulator.

Ønskede massestrømmer (loggede verdier fra SD-anlegg) sammenliknes med massestrømmer benyttet som inndata i programvaren. Et punktdiagram er vist i Figur 16 for å illustrere at målte verdier for massestrømmer ikke er like dem som benyttes i simuleringer for validering. Dette er ikke en undersøkt variabel i likhet med temperatur og termisk effekt, men en parameter som påvirker verdier for både temperatur og termisk effekt.



Figur 16: Punktdiagram – massestrøm.

Validering med hensyn på termisk effekt gjøres ved hjelp av målt og simulert massestrøm samt målte og simulerte temperaturer. Termisk effekt beregnes etter Likning 16.

$$Q = \dot{m} \cdot C_P \cdot \Delta T \quad (16)$$

Hvor:

- Q er termisk effekt
- \dot{m} er massestrøm
- C_P er mediets spesifikke varmekapasitet
- ΔT er temperaturdifferanse

3.5 Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalysen innebærer å undersøke påvirkningen ulike uavhengige variabler har på avhengige variabler. I dette prosjektet betraktes de uavhengige variablene listet i Tabell 5, disse omtales som parametere. De avhengige variablene energiopptak fra brønnparken, energibidrag fra topplast og energikonsum i varmepumpens kompressor evalueres.

Ved sensitivitetsanalyse er referansesystemet definert som utgangspunkt, hvorpå man varierer uavhengige variablers størrelse én etter én for å undersøke påvirkningen endringer har på avhengige variabler. For eksempel varieres antall borehull med $\pm 20\%$ for å undersøke endringen dette har på termisk effekt i brønnparken. Slik gjennomføres også sensitivitetsanalyse med $\pm 10\%$ endring. Endringen sammenliknes prosentvis med referansesystemet, slik at man kan se hvilke uavhengige variabler som har størst prosentvis påvirkning på de avhengige variablene.

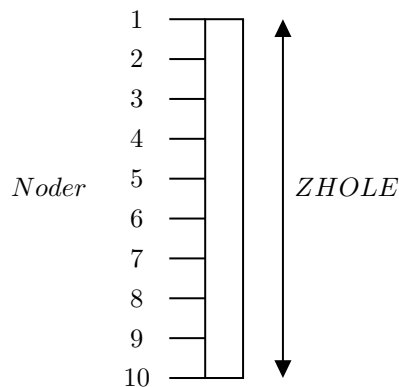
For sensitivitetsanalyse benyttes parameterstørrelser for base case og endringer ved $\pm 20\%$ og $\pm 10\%$ som vist i Tabell 5.

Tabell 5: Parameterverdier ved referansesystem og endringer.

Parameter	-20	-10	Referansesystem	+10	+20
Borehullsdybde [m]	175	197	219	241	263
Antall borehull [-]	8	9	10	11	12
Konduktivitet i fyllmasse [W/mK]	0,48	0,54	0,6	0,66	0,72
Konduktivitet i grunn [W/mK]	1,8	2	2,25	2,5	2,7
Massestrøm [kg/s]	1,6	1,8	2	2,2	2,4
Borehullenes radius [m]	0,046	0,052	0,0575	0,063	0,069

Sensitivitetsanalysen gjennomføres for referansebygget beskrevet i delkapittel 3.2.

Temperatur i grunnen undersøkes også ved variasjon av parameterne. IDA ICE benyttes for å fremstille temperatur i borehullene ved ulike dybder. Temperatur i borehull defineres ved ti noder, jevnt fordelt over borehullets lengde, som illustrert i Figur 17.



Figur 17: Temperatur i grunn – noder.

3.6 Parametrisk analyse og GenOpt

Gjennom parametrisk analyse skal de ulike parameterens påvirkning på energikonsum analyseres. Ved analysen finnes optimale verdier for ulike parametere for å minimere energikonsum i topplasten og kompressor innen et rimelig intervall.

Flere parametere kan påvirke energikonsumet, som massestrøm, borehullenes dybde og antall. Eksempelvis vil analysen gjennomføres slik at massestrømmen og dybden holdes konstant og antall borehull varierer innen ønsket intervall. Da får man resultater for energikonsum ved hvert undersøkt tilfelle av antall brønner, gitt konstant massestrøm og dybde. Neste steg i analysen er å holde antall borehull konstant og variere en av de andre parameterne. Slik itererer man seg gjennom prosessen helt til alle verdier innen ønskede intervall er undersøkt for alle parametere.

En slik prosess med mange variabler og betydelig oppløsning genererer store mengder data. Med datamaskiners begrensede kapasitet, betyr dette mye tidsbruk til simulering. Modellen for parametrisk analyse i dette prosjektet inneholder variabler for:

- Klima (Oslo, Stavanger, Tromsø)
- Antall borehull
- Borehullenes dybde
- Massestrøm
- Varmtvannstankens radius (diameter-høydeforhold er 1:5)
- Vinduers U-verdi

For å begrense simuleringstiden, samt å finne optimale innputverdier benyttes programtillegget GenOpt (Generic Optimization) i IDA ICE. GenOpt er utviklet ved Lawrence Berkeley National Laboratory i USA. Til forskjell fra "standard" parametrisk analyse i IDA ICE, tester GenOpt uavhengige variabler for å finne optimale verdier for de avhengige variablene, med hensyn på ønsket rolle for avhengige variabler.

For simulering av minimert energibruk i bygningen med hensyn på de uavhengige variablene gir man den avhengige variabelen *energibruk* rollen "MIN" (minimum). Når man så starter simuleringen for optimalisering, vil GenOpt teste ulike verdier for uavhengige variabler innen gitte grenser. Dersom energibruken mot formodning *øker* etter flere iterasjoner avsluttes simuleringen og nye verdier for uavhengige variabler prøves. Dersom resultatene viser at energibruken reduseres, fortsetter simuleringen og nye verdier for uavhengige variabler benyttes. Dersom programvaren oppdager at energibruken ikke reduseres vil oppløsningen for undersøkte uavhengige variabler reduseres for å finne en optimal verdi.

Mer matematisk formulert, la y være en funksjon av x :

$$y = f(x)$$

La den uavhengige variabelen være: $x \in [1, 4]$. La oss si at y er en verdi man ønsker å minimere. Da kan man i IDA ICE gi y rollen: *minimum* ("MIN"). GenOpt åpner da for å finne verdier mellom de definerte verdiene for x . Dersom det viser seg at $x = 0.5$ gir en lavere verdi for y , ivaretas resultater for denne simuleringen. Dersom $x = 0.5$ derimot viser seg å ikke redusere y , vil nye verdier for x prøves for å finne den verdien som gir minst verdi for y . For simulering med GenOpt angis største og minste verdier for parameterne innen rimelighetens grenser.

Følgende grenser settes for de undersøkte parameterne:

- ZHOLE: $50m - 400m$
- NHOLE: $1 - 20$
- MFLOW: $1 \frac{kg}{s} - 5 \frac{kg}{s}$
- RTANK: $0.1m - 1m$
- U-verdi: $0.6 \frac{W}{m^2 \cdot K} - 0.8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Når optimalt tilfelle for energikonsum er funnet, undersøkes det hvordan de samme parameterne påvirker investeringskostnader. Priser for investering og energi hentes fra henholdsvis Norsk Prisbok 2019-01 og Statistisk Sentralbyrå. Lavere energiforbruk medfører lavere driftskostnader. Likevel kan besparelsen i forhold til utgangspunktet og investeringskostnader være for liten til å medføre økonomiske fordeler med hensyn på kostnader.

For optimalisering av levert energi (lavt energiforbruk) benyttes rollen "MIN" i kombinasjon med Graphical Script i IDA ICE. Graphical Script muliggjør sammensetning av egne formler for bruk til optimalisering og sensitivitetsanalyser. Dette benyttes for å summere energi tilført topplast og kompressor, før det legges til Parametric Run med rollen "MIN" i IDA ICE. Fra simuleringresultater for lavt energiforbruk utarbeides et alternativ for lavere kostnader med hensyn på investering og drift.

I dette prosjektet benyttes GenOpt med initial algoritme som består av en kombinasjon av PSO (*Particle Swarm Optimization*) og GPS (*Generalized Pattern Search*) med Hooke-Jeeves. Denne kan benyttes for både diskrete og kontinuerlige variabler. Hooke-Jeeves-premisset sørger for at "retning" hvor optimale forhold finnes iverksettes til neste iterasjon. På den måten gjøres prosessen kostnadsbesparende med hensyn på datakraft til simulering. PSO fungerer ved at partikler "spres" utover et område definert av øvre og nedre grenser satt for simuleringen. Disse partiklene søker en optimal verdi og flytter seg nærmere denne etter hvert som iterasjonene prosesseres. Etter en iterasjon vil en av partiklene ha en mer optimal verdi enn de andre og påfølgende iterasjoner jobber seg da mot dette punktet.

3.6.1 Kostnadsvurdering

Kostnadsvurderingen gjøres for å kaste lys over hvilke parametere som er gunstig med hensyn på energikonsum og investeringskostnad. Dette sammenliknes med referansesystemet på den aktuelle lokasjonen for å avgjøre hvorvidt referansesystemet kan forbedres med hensyn på både energi og kostnad. Se Tabell 6 for priser benyttet i dette prosjektet.

Tabell 6: Priser – kostnadsvurdering.

Vare	Pris	Referanse
Boring i fjell, inntil 1000m [kr/m]	190	Norsk Prisbok (2019): 03.2.5.0915
Boring i fjell, over 1000m [kr/m]	154	Norsk Prisbok (2019): 03.2.5.0916
Kollektorslange med sprit [kr/m]	41	Norsk Prisbok (2019): 03.2.5.0917
Foringsrør [kr/m]	925	Norsk Prisbok (2019): 03.2.5.0910
Varmepumpe [kr/kW]	6166	Norsk Prisbok (2019): 03.2.5.0955
Bereder [kr/l]	40	Norsk Prisbok (2019): 03.1.5.3.0410
Vindu $U = 0,6/0,7/0,8$ [kr/m^2]	4460/3580/2701	Norsk Prisbok (2019): 02.3.K
Topplast [kr/kW]	2312	Norsk Prisbok (2019): 03.2.5.1000
Energipris [kr/kWh]	0,548	Statistisk sentralbyrå (2019)

4 Resultater og diskusjon

I dette kapitlet presenteres resultater for validering, sensitivitetsanalyse og optimalisering med tilhørende drøfting.

4.1 Årlig energibehov

Årlig spesifikt energibehov for referansebygget ved de undersøkte lokasjonene er beregnet ved hjelp av simuleringer, se Tabell 7.

Tabell 7: Simulerte resultater – spesifikt energibehov.

Sted	Beregnet netto spesifikt energibehov [$kWh/m^2 \cdot \text{år}$]	
	Oppvarming	Kjøling
Oslo	15,7	6,4
Tromsø	19,3	1,0
Stavanger	8,9	2,4

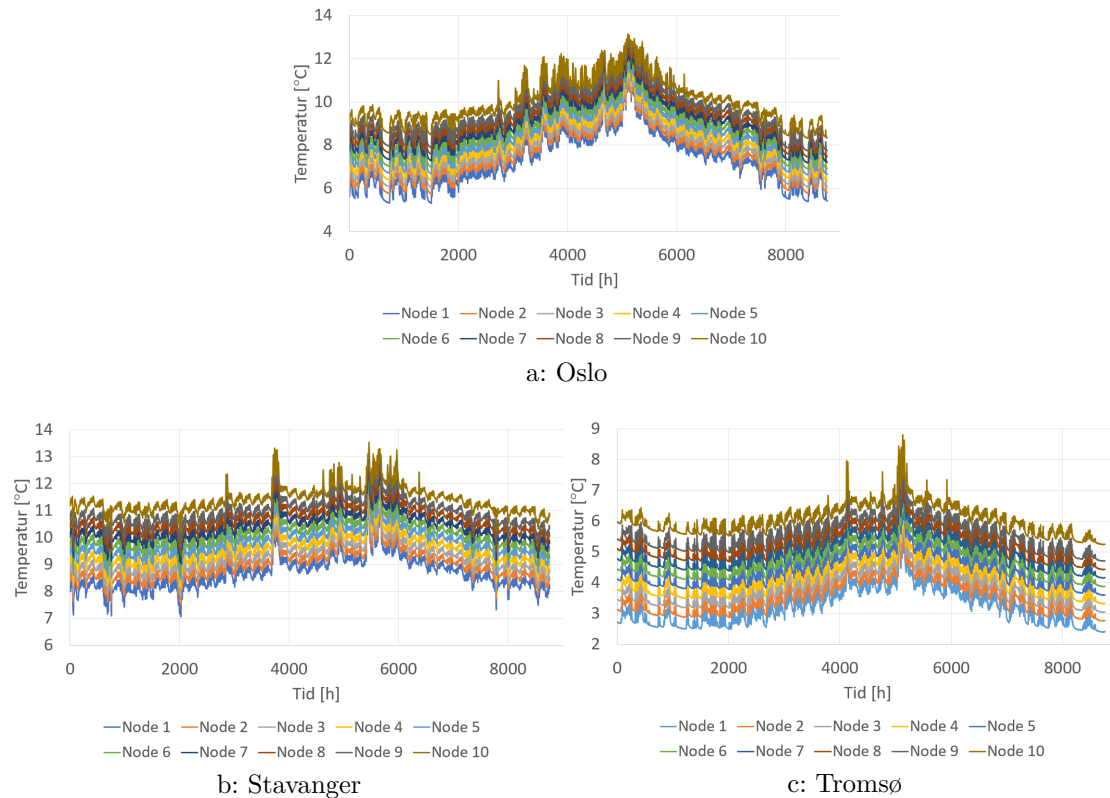
Ved sammenlikning med verdiene i Tabell 4 ser man at energikrav er innfridd for alle tilfeller.

I modellen er det primært brukt isolasjon for å begrense varmetap. I realiteten kan man lagre varmen i bygget på bedre egnede måter for å få en jevn romtemperatur over døgnet. Simulering med hensyn på utnyttelse av termisk masse kan medføre lavere energibruk ved at varme lagres i konstruksjonen over dagen og kjøles i løpet av natta ved hjelp av ventilasjon. Bygningen er implementert i modellen for å kontrollere at energibruken imøtekommer krav for passivhus i henhold til NS 3701. Med det etablert, kan funnene i denne oppgaven anvendes i andre prosjekter hvor passivhus skal oppføres. Man kan også benytte samme metode og fremgangsmåte for lavenergibygg eller konvensjonelle bygninger ved at påvirkende parametere som internlaster, arealer og U-verdier i modellen justeres i henhold til aktuell standard.

4.2 Temperaturforløp i grunn

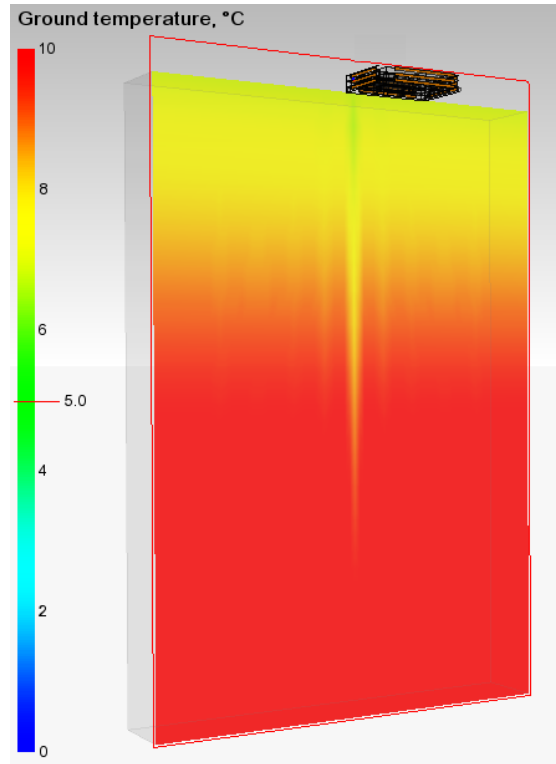
Figur 18 viser temperaturforløpet i borehull ved ulike lokasjoner. Ti noder fungerer som målepunkter og er jevnt fordelt over borehullets dybde, som beskrevet av Figur 17. Avstand mellom nodene bestemmes av borehullets dybde. Det viser seg at alle borehull har lik temperatur ved tilsvarende noder.

Figur 18: Temperaturforløp i grunnen – referansesystem



For referansesystemet ser man en tydelig høyere temperatur i grunnen for Stavanger, sammenliknet med Tromsø og Oslo. Figurer for temperaturforløp (med 20% parameterendring) er lagt i vedlegg B.2 på grunn av antall og størrelse. Borehullenes dybde har størst innvirkning på temperatur i grunnen, hvilket skyldes temperaturgradienten. Resultatene viser lave grunntemperaturer på vinterstid, og høyere temperaturer på sommeren. Ved varmedrift flyttes varmen fra grunnen til bygningen, derav lave temperaturer. Ved kjøledrift ønsker man å flytte varme fra bygningskroppen til grunnen, dermed øker temperaturen. Temperaturen ser ut til å svinge tilbake til opprinnelige nivåer ved årets slutt. Antall hull og massestrøm endrer ikke temperaturforløpet i særlig grad. Av Figur 18 ser det ikke ut til at det oppstår problemer med betydelig nedkjøling av grunnen. Dette kan undersøkes ved simulering over lengre perioder.

Animasjon av temperaturutvikling i grunnen er fremstilt i IDA ICE. Denne funksjonen gjør det mulig å visuelt overvåke temperaturutvikling i grunnen rundt borehullene. Et utklipp fra programvaren er vist i Figur 19.

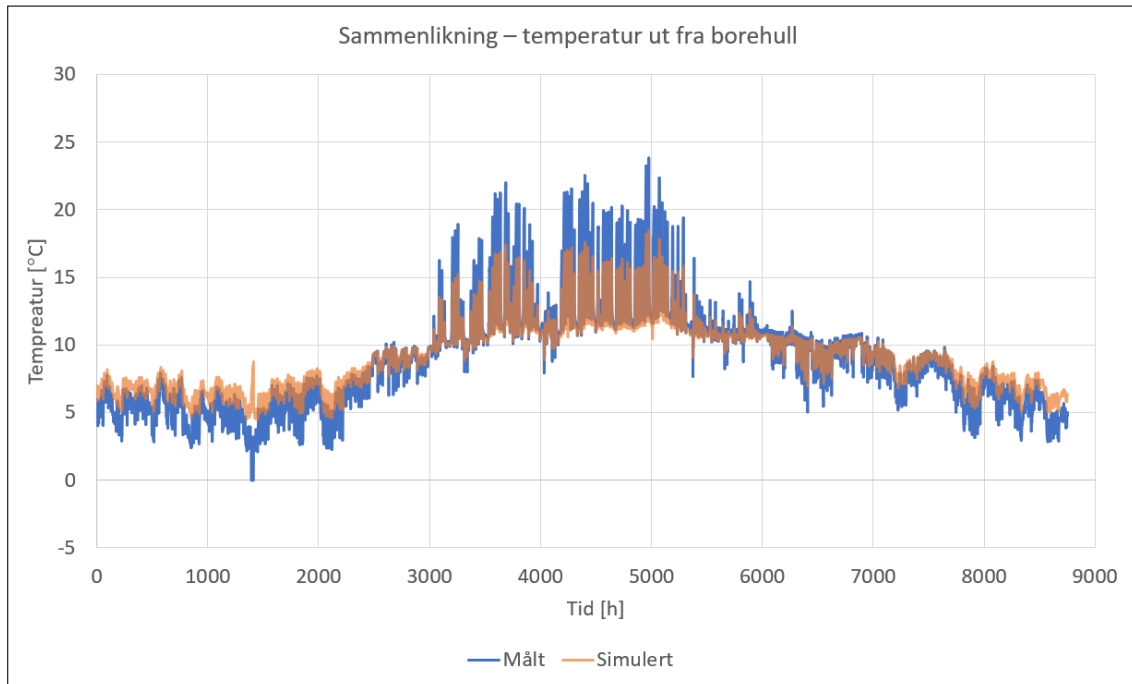


Figur 19: Utklipp fra IDA ICE – animasjon av grunntemperatur.

Bildet i Figur 19 viser grunntemperatur i og rundt borehullene 4. januar for Tromsøklime med 12 borehull. Inndata for borehull inkluderer verdier for kalkulasjoner og visualisering. Disse verdiene implementeres med hensyn til den anvendte datamaskinens prosessor og grafikkort, hvilket medfører lav oppløsning i visualisering i dette tilfellet. For høy oppløsning og stor grad av nøyaktighet i det visuelle bildet bør datamaskinen som benyttes ha maskinvare som yter tilstrekkelig. Visualiseringens oppløsning er her definert av 20 punkter i hver retning i det tredimensjonale koordinatsystemet. Grenser for beregning settes til 100m fra borehullets ytre grense, med 10 noder per borehull og 12 gitterlag for grunn.

4.3 Validering

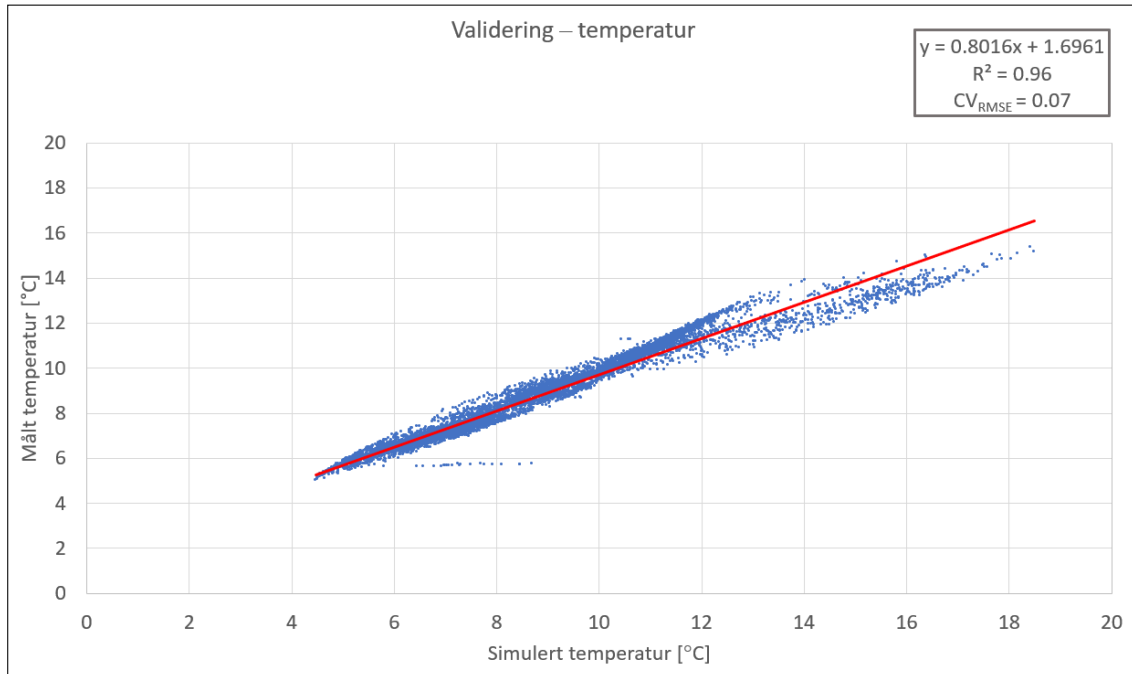
Figur 20 viser grafer for målte og simulerte verdier for temperaturer ut fra borehullet, driftsåret 2018. Det er antatt en grunntemperatur på 2°C høyere enn årsmiddel lufttemperatur for stedet i samsvar med antakelser beskrevet av Norges geologiske undersøkelse (u.d.). Tilsvarende figur for termisk effekt finnes i vedlegg B.



Figur 20: Sammenlikning av T_{ut} .

Av Figur 20 ser man at målt og simulert temperatur stemmer bra overens. Det ser ut til at simulert temperatur har høyere verdi enn målt temperatur i kalde perioder, og motsatt i varme perioder. Likevel beregnes et gjennomsnittlig avvik mellom målt og simulert temperatur over året til $0,95^{\circ}\text{C}$. Dette betraktes som et lite avvik. Avviket skyldes sannsynligvis forenklingen påkrevd ved styring av massestrømmen som redegjort for i delkapittel 3.1.1. En må også regne med å finne avvik på grunn av gjennomsnittsberegningen, ved at logger for hvert femte minutt er omgjort til timesverdier for bruk som inndata.

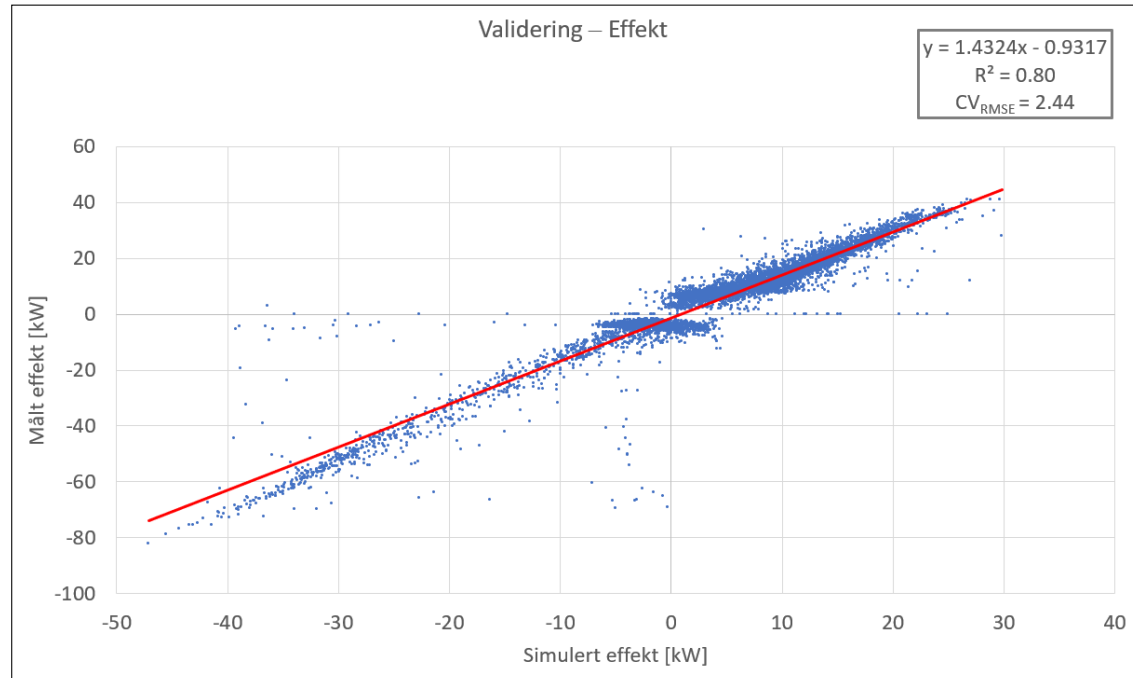
Figur 21 viser punktdiagram for målt og simulert temperatur i varmbærer ved brønnparkens utløp. Fra dette utarbeides determinasjonskoeffisienten R^2 og variasjonskoeffisientet for *root mean square error* CV_{RMSE} .



Figur 21: Punktdiagram – temperatur.

Figur 21 viser at $R^2 = 96\%$, som betyr at variasjon i simulert temperatur ut fra borehullet kan forklares av variasjonen i målt temperatur. Dette tyder på at modellen har et bra potensiale for å gi resultater som samsvarer med målte verdier. Figuren viser også en lav verdi for variasjonskoeffisienten CV_{RMSE} hvilket tyder på at målte verdier stemmer godt overens med simulerte verdier. Av punktdiagrammet kan man se at verdiene er godt samlet rundt regresjonslinjen ved lave temperaturer. Modellen har en tendens til å simulere lavere temperatur enn målt temperatur inntil ca. $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvor trenden snur og høyere temperaturer finnes ved simulering enn ved måling. Dette fører til at regresjonslinjen har et stigningstall litt under 1, på 0,8. Det forekommer mer spredning i resultatene ved høye temperaturer.

Figur 22 tilsvarende punktdiagram med hensyn på målte og simulerte verdier for termisk effekt. Beregningen for å nå disse målingene innebærer en rekke forenklinger og antakelser, hvilket gjør dem mindre nøyaktige enn resultatene ved validering av temperatur.



Figur 22: Punktdiagram – termisk effekt.

Punktdiagrammet for målt og simulert termisk effekt viser en relativt høy verdi for R^2 , i likhet med validering av temperatur. Valideringen med hensyn på termisk effekt er likevel ikke tilfredsstillende. På grunn av store kvadratsummer i avvik, får man $CV_{RMSE} > 1$. Dette skyldes at standardavviket overgår gjennomsnittsverdien for målt effekt.

Det er tydelig stor spredning i resultatene, særlig ved målt effekt lavere enn 0 kW. Dette kan ha sammenheng med måten fortegnet er beregnet på. Energimålere ved Powerhouse Kjørbo skiller ikke mellom varme- og kjøledrift. I tillegg til å gjøre gjennomsnittsbærende målinger fra femminuttersintervall til timesverider, antas det at målt effekt og simulert effekt har samme fortegn og driftsmodus. Dette innebærer at ved simulerte verdiers fortegn er overført til målte verdier i energimåleren.

Dette er et eksempel på at R^2 ikke nødvendigvis forteller hele sannheten om hvor godt modell og virkelighet stemmer overens. Her kan 80% av variasjon i simulerte verdier forklares av variasjonen i målte verdier, og likevel viser CV_{RMSE} store avvik.

4.4 Sensitivitetsanalyse

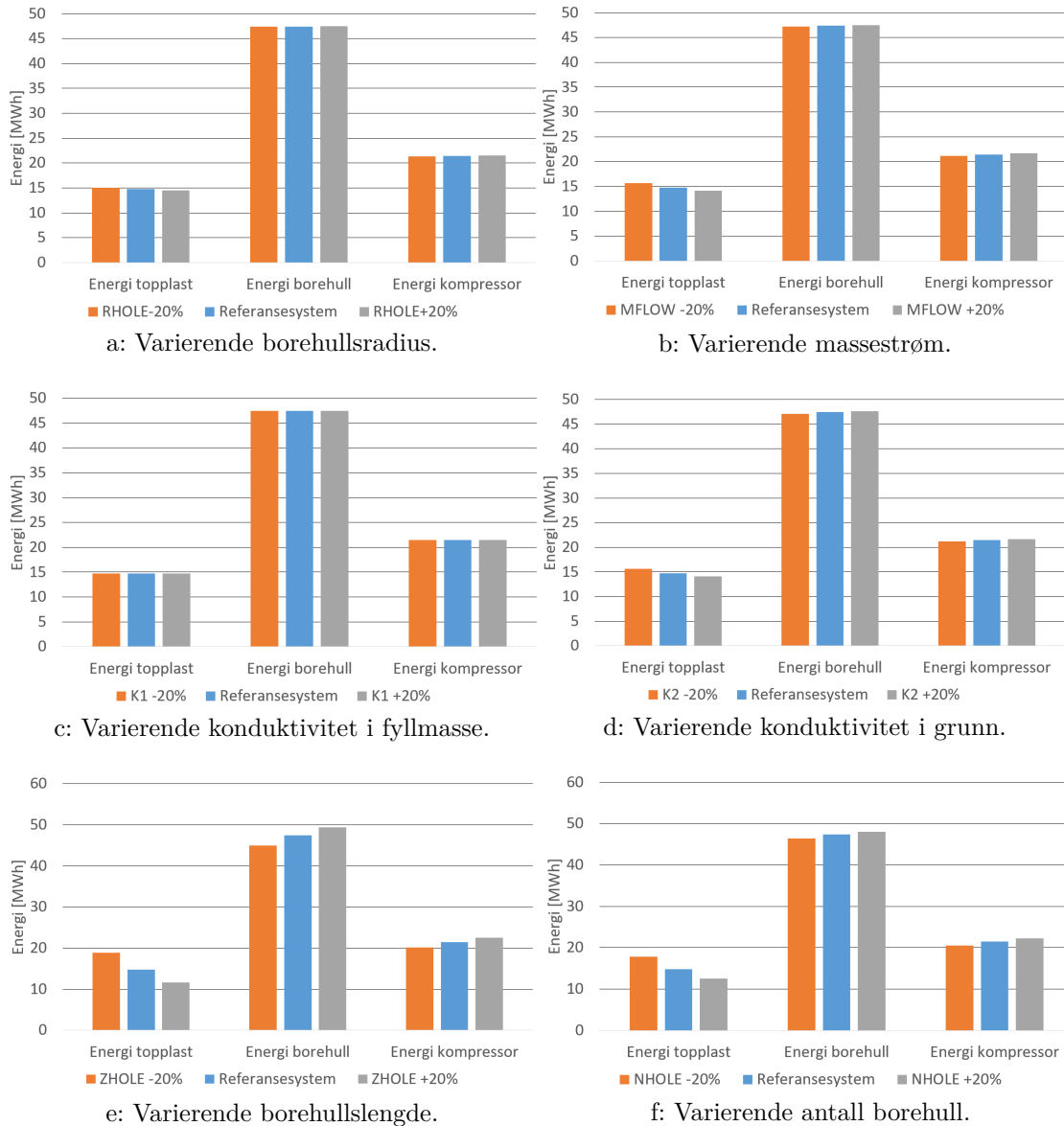
Resultater for energioptak fra borehull samt energikonsum i topplast og varmepumpens kompressor for referansesystemer presenteres i figurene 23 - 25.

Ved Oslo klima ser man et klart bidrag fra topplast, og enda mer fra kompressor. Dette indikerer at grunnlasten dekker større deler av energibehovet. Energiandelen for topplast i Stavanger klima er minimal. Dette antyder at grunnlasten er rikelig dimensjonert og dermed dekker det meste av energibehovet. Energoptaket i borehullet viser seg størst i Tromsø klima. Dette er naturlig ettersom Tromsø har kaldest klima av de undersøkte lokasjonene. Kompressorenergi er lavere for Stavanger enn for både Oslo og Tromsø. Dette kan sees i sammenheng med at varmebehovet er lavere i et varmere klima. Ved samtlige klimasteder påvirkes energipostene lite av borehullenes radius og konduktivitet i fyllmasse og grunn.

Forklaring av parametere:

- RHOLE – Radius borehull [m]
- MFLOW – Massestrøm [kg/s]
- K2 – Termisk konduktivitet grunn [$W/(m \cdot K)$]
- K1 – Termisk konduktivitet fyllmasse [$W/(m \cdot K)$]
- NHOLE – Antall borehull [–]
- ZHOLE – Dybde borehull [m]

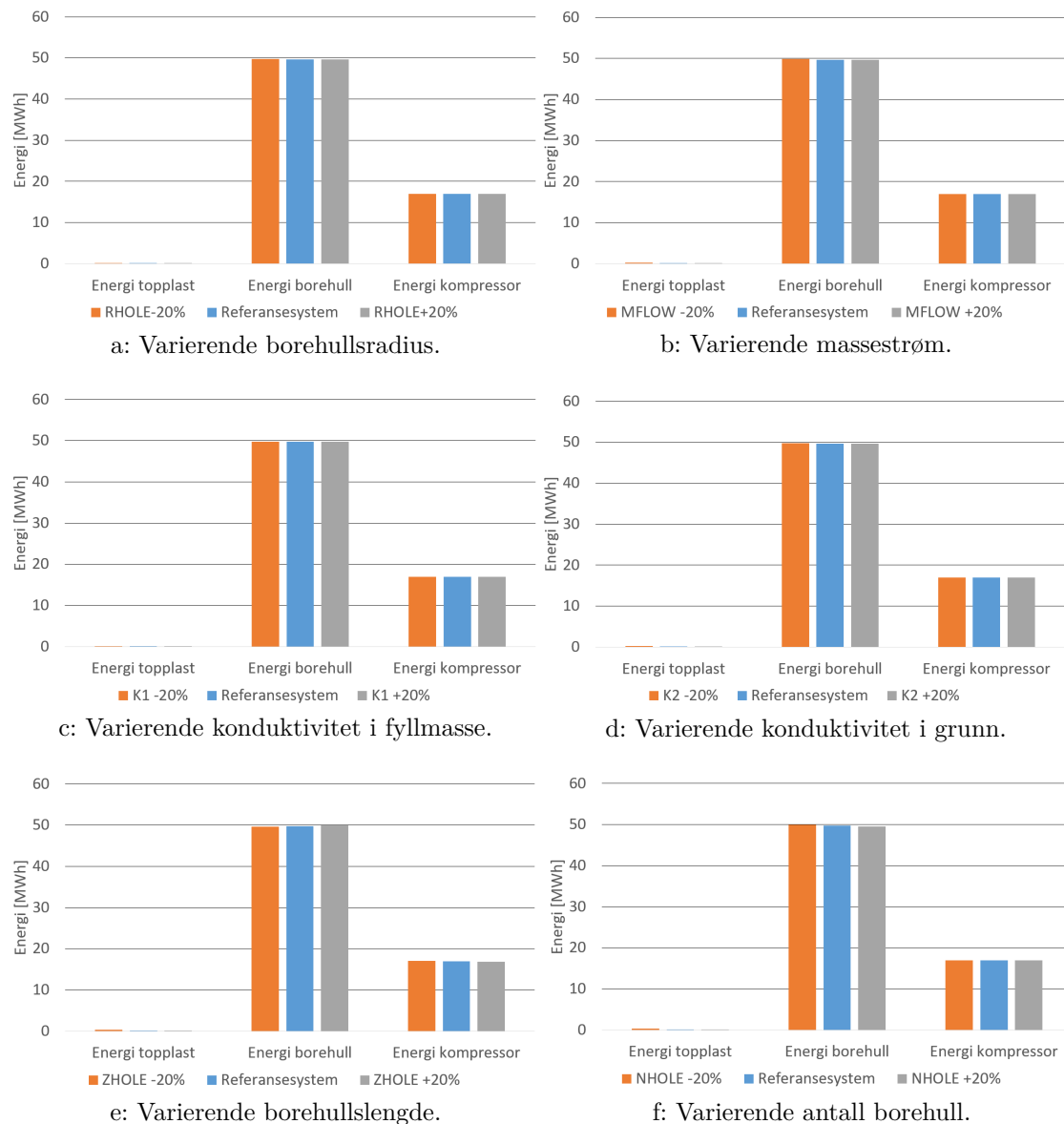
Figur 23: Energi – sensitivetsanalyse Oslo



For Oslo klima øker mengden opptatt energi fra borehullet med 1951 kWh ved 20% økning i borehullslengde, sammenliknet med referansesystemet. Ved reduksjon i borehullslengde minker energiopptaket med 2427 kWh. Ved endring av borehullenes lengde ser man også størst endring i energikonsum for topplasten. Ved økt borehullslengde reduseres topplastbidraget med 3079 kWh, sammenliknet med referansesystemet. Ved 20% reduksjon i borehullslengde er tilsvarende differanse 4132 kWh. Reduksjon i topplastbidrag forventes å minke ved økt borehullslengde, ettersom dette medfører større potensiale for varmeoverføring til og fra grunnen. Den samme argumentasjonen kan benyttes for forklaring av økt energikonsum i kompressor. Energikonsum i kompressor øker med 1010 kWh ved økt borehullslengde og minker med 1304 kWh ved redusert

borehullslengde. Endring i antall borehull viser endring i samme trend som ved endring av borehullslengde, men i mindre grad. Energi bidraget minker med 2178 kWh ved økt antall borehull, og øker med 3055 kWh ved redusert antall borehull. Energiopptak i grunnen øker med 992 kWh og reduseres med 646 kWh ved henholdsvis 20% økning og reduisering av antall borehull. Ved varierende massestrøm ser man lik trend som for varierende borehullslengde og -antall, men i enda mindre grad.

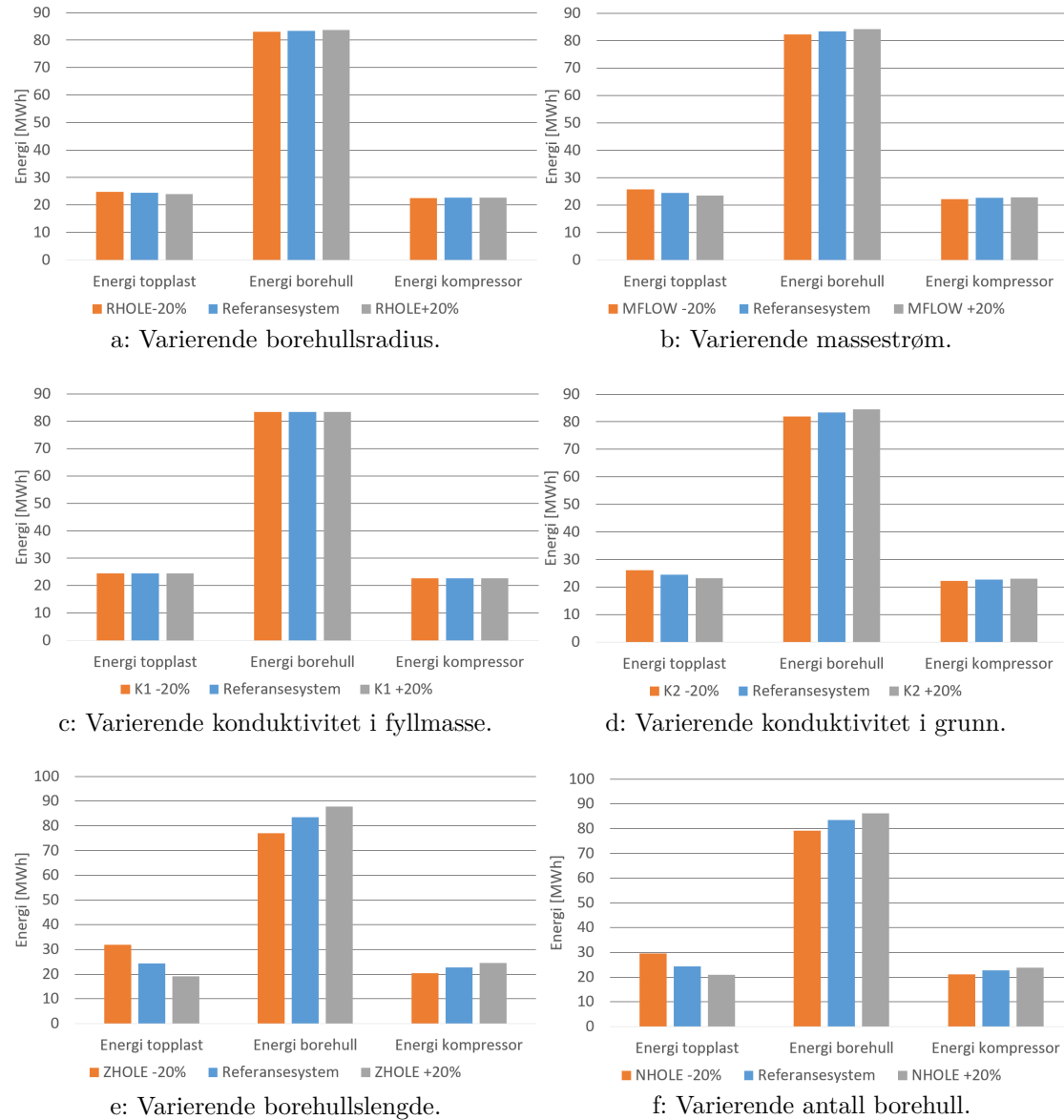
Figur 24: Energi – sensitivitetsanalyse Stavanger.



Endring av parameterverdier på 20% viser seg å være av liten betydning for samtlige energiposter i Stavangerklima. Den største differansen i energiopptak i borehullet er på 239 kWh og finnes

ved sammenlikning av 20% kortere borehullslengde sammenliknet med referansesystemet. Liten differanse i energipostene kan sees i sammenheng med dimensjonen av brønnpark og varme-pumpe. Topplasten bidrar lite, hvilket tyder på at grunnlasten dekker energibehøvet. Man må muligens dimensjonere ned referansesystemet for å se endringer ved bruk av denne metoden, da alle undersøkte tilfeller ser ut til å mette energibehøvet.

Figur 25: Energi – sensitivitetsanalyse Tromsø.



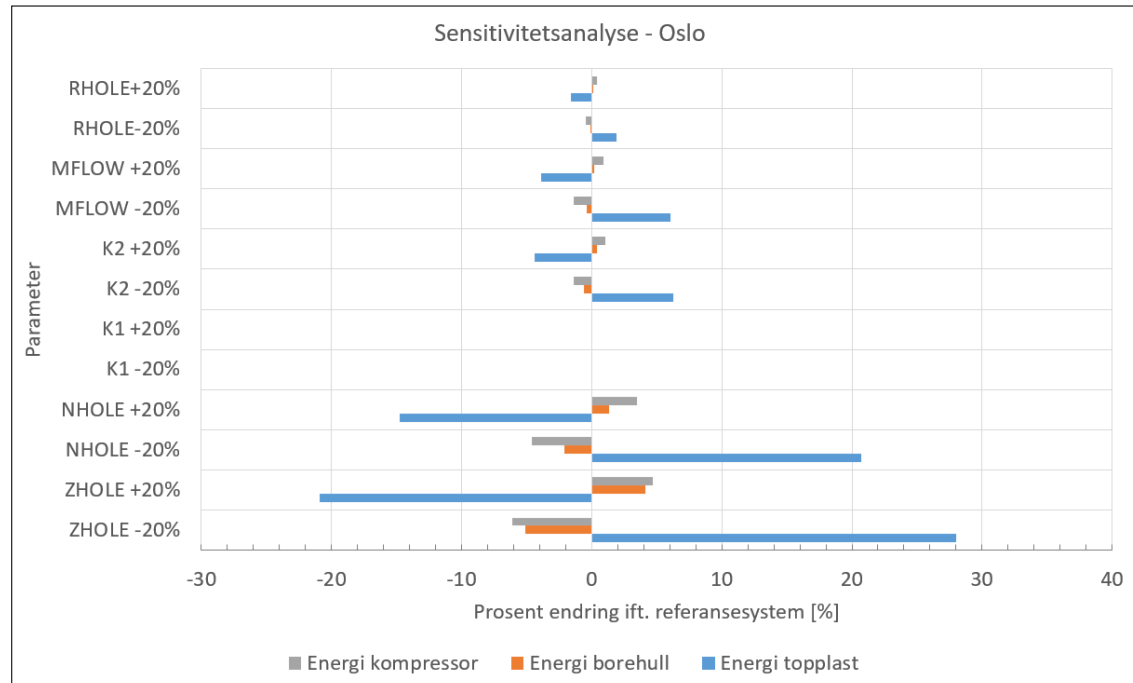
For Tromsøklima ser man, i likhet med Osloklima, en endring i opptatt energi i borehullet ved varierende borehullslengde, såvel som ved variert antall borehull. Høyere verdier vises for energipostene for Tromsøklima enn ved Osloklima. Dette kan skyldes et kaldere klima og dermed et økt varmebehov. Ved 20% økning i borehullslengde øker energiopptaket med 4308 kWh sammenliknet

med referansesystemet. Ved 20% reduksjon av borehullslengde minker energiopptaket med 6414 kWh. Topplastbidraget reduseres med 5266 kWh ved 20% økt borehullslengde og øker med 7515 kWh ved redusert borehullslengde. Energikonsumet i kompressoren øker ved økt borehullslengde, med 1795 kWh og reduseres med 2295 kWh ved redusert borehullslengde.

En 20% økning i antall borehull øker energiopptaket med 2816 kWh. Tilsvarende endring ved 20% reduksjon i antall borehull er 4277 kWh i negativ retning. Endring i topplastbidraget er noe mindre for variert antall borehull enn for variert borehullslengde, men har samme trend. Topplastbidraget reduseres med 3435 kWh ved 20% økning i antall borehull, og øker med 5042 kWh når antall borehull reduseres med 20%. Energikonsum i kompressoren øker med 1152 ved økt antall borehull og reduseres med 1522 kWh ved 20% færre borehull. Endringen i kompressorenergi er noe mindre enn ved de andre energipostene, noe som kan sees i sammenheng med varmepumpens effektfaktor.

En 20% økning i antall borehull i referansesystemet medfører utvidelse av brønnparken med 428 meter borehull. En 20% økning i borehullslengde i referansesystemet medfører 2628 meter borehull. Dette tatt i betraktning er det naturlig at variert borehullslengde gjør større utslag på energipostene enn antall borehull. Fra et økonomisk perspektiv ser det ut til å være mer lønnsomt å investere i flere borehull enn i økt borehullsdybde. Dette forutsetter at kostnaden per meter borehull er uavhengig av borehullsdybde. Større differanse i de ulike energipostene for varierende borehullsdybde, sammenliknet med variasjon i de andre uavhengige variablene, kan forklares ved temperaturgradienten implementert i programvaren.

Bearbejdede resultater for prosentvis endring i parameterstørrelse for referansesystemet ved ulike lokasjoner vises i tornadodiagram i figurene 26, 27 og 28. Grafene for sensitivitetsanalyse angir endring i energien opptatt i borehullet og energi tilført via topplast, samt energi tilført kompressoren ved 20% endring i de ulike parameterne.

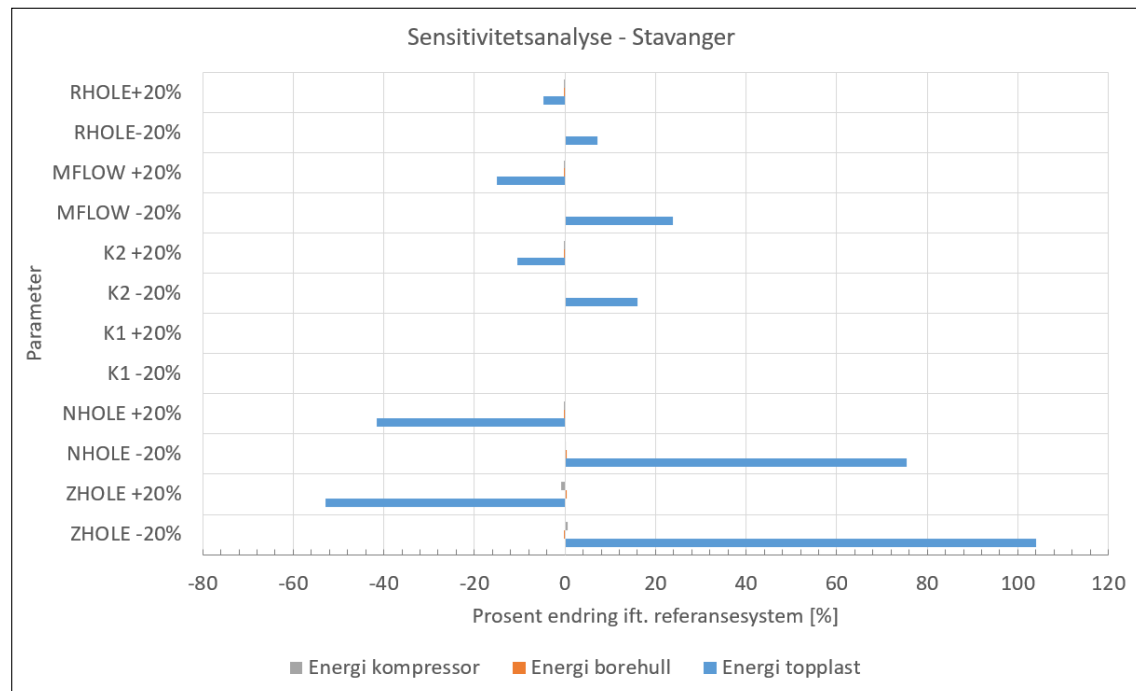


Figur 26: Tornadodiagram – 20% parameterendring, Oslo klima.

For Oslo ser man endringer i samsvar med tidligere diskuterte figurer. Antall borehull, borehullenes lengde og massestrøm har størst innvirkning på undersøkte variabler. For Oslo ser man endringer i topplastens årlige bidrag på inntil 28%. Avhengig av type topplast kan man redusere energikostnadene ved topplastfyring dersom man øker borehullslengden med 20%. På samme måte reduseres topplastbidraget betraktelig ved økning av antall borehull, med omtrent 15%.

For energi opptatt i borehullet er det viktig å ta kjøledriften i betraktning. Ved kjøledrift vil varme tilføres grunnen og betraktes med negativ effekt. Dette har potensiale for å "nulle ut" det økte energiopptaket ved økte parameterverdier. Likevel ser man en økning i opptatt energi ved økt borehullslengde og -antall, i samsvar med forventninger ettersom klimaet er kaldt og varmebehovet er større enn kjølebehovet. Kompressorenergi endrer seg i takt med borehullsenergi, som forventet ettersom det er energiopptak fra borehullet som omsettes i kompressoren.

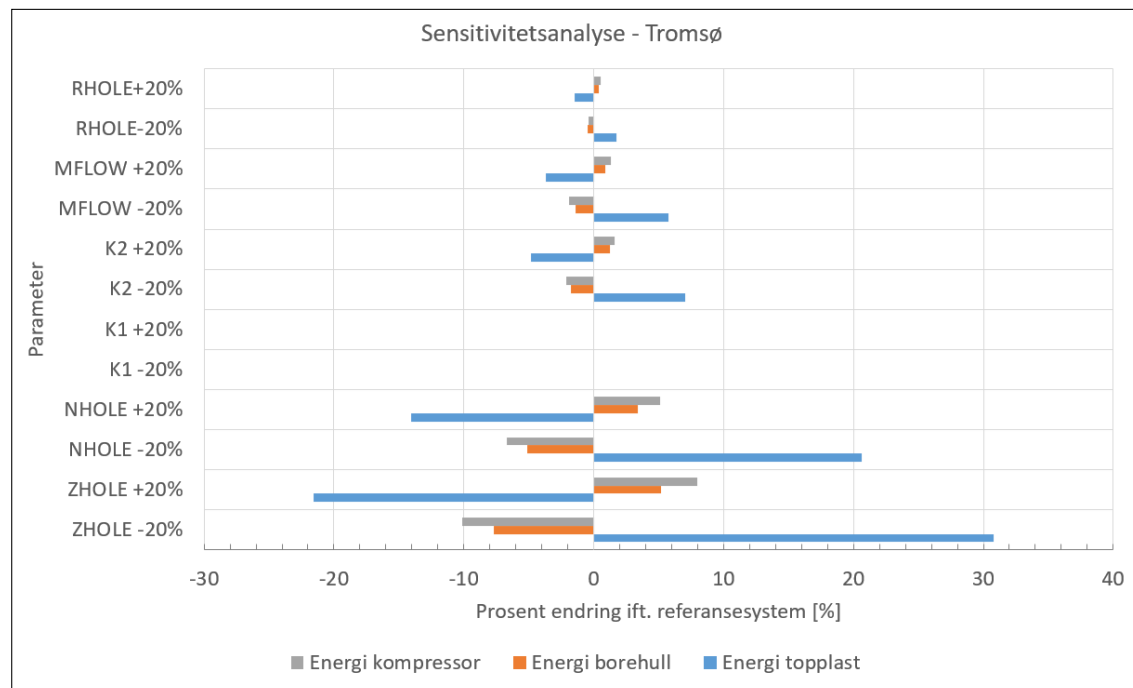
Stavangerklima byr på liten endring i både kompressor- og borehullsenergi, illustrert i Figur 24. Likevel ser man at grafene når høye verdier for prosentvis endring i Figur 27.



Figur 27: Tornadodiagram – 20% parameterendring, Stavangerklima.

De store utslagene forklares av at lav absolutt endring medfører større relativ endring. Eksempelvis øker topplastenergien med 180 kWh i forhold til referansesystemet ved 20% reduksjon av borehullslengde i Stavanger. Tilsvarende endring for Oslo er 4132 kWh. På denne måten kan relativ (prosentvis) endring gi et feilaktig inntrykk av endret energikonsum.

For Tromsøklima ser man liknende relative endringer som ved Osloklima, se Figur 28.



Figur 28: Tornadodiagram – 20% parameterendring, Tromsøklima.

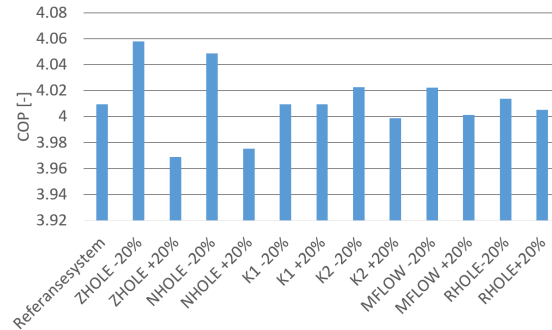
En større relativ endring gjelder ved samtlige undersøkte variabler sammenliknet med Osloklima. Sett i sammenheng med større absolutte endringer for Tromsøklima enn ved Osloklima i Figur 25, indikerer dette et større potensiale for energibesparelse i Tromsø enn for Osloklima. Det er naturlig å forvente en større endring i undersøkte variabler for Tromsøklima ettersom klima er kaldere lenger nord.

Om man ser observasjonene med ved ulike parameterendringer i sammenheng ser man en større prosentvis endring i negativ retning for kompressor- og borehullenergi, og en større prosentvis endring i positiv retning for topplastenergi. Med dette kan det argumenteres for at "gevinsten" er lavere ved økning i parameterverdiene enn "tapet" ved reduksjon i parameterverdier.

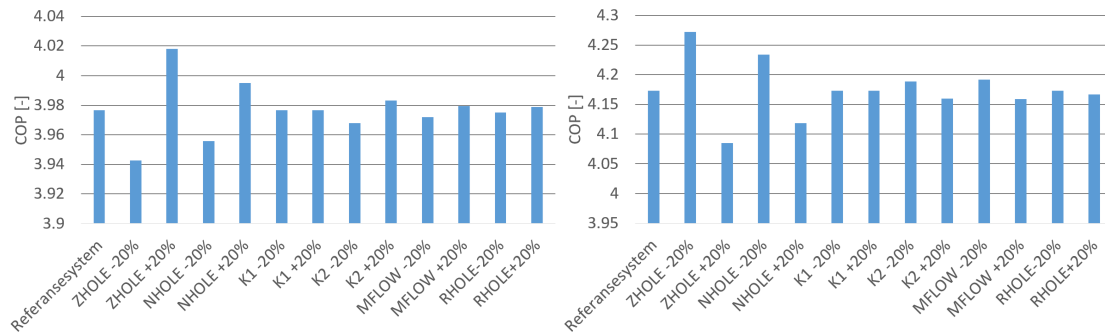
Et av de interessante funnene her er at endring i konduktivitet ($\pm 20\%$ og $\pm 10\%$) i fyllmassen rundt rørene i borehullet ikke har noen betydelig innvirkning på energioptak i borehullene. Det er kjent at fyllmasse brukes for å øke varmeledningsevnen, men ved anlegget av størrelsen simulert i denne oppgaven ser det ut til å være neglisjerbar endring ved å variere størrelsen $\pm 20\%$. Dersom dette hadde vist seg å øke varmeoverføringen betraktelig, ville det vært et relativt enkelt tiltak å gjennomføre i tidlig fase for å sikre god drift av energibrønner. Konduktivitet for grunnen viser seg derimot å ha noe innvirkning på de undersøkte variablene. Dette er likevel ikke en parameter man kan velge ved prosjektering. Man er prisgitt den konduktivitet materialet i grunnen på stedet har.

Absoluttverdier for COP ved ulike lokasjoner og parameterendringer er vist i Figur 29.

Figur 29: COP – sensitivitetsanalyse.



a: COP – Oslo



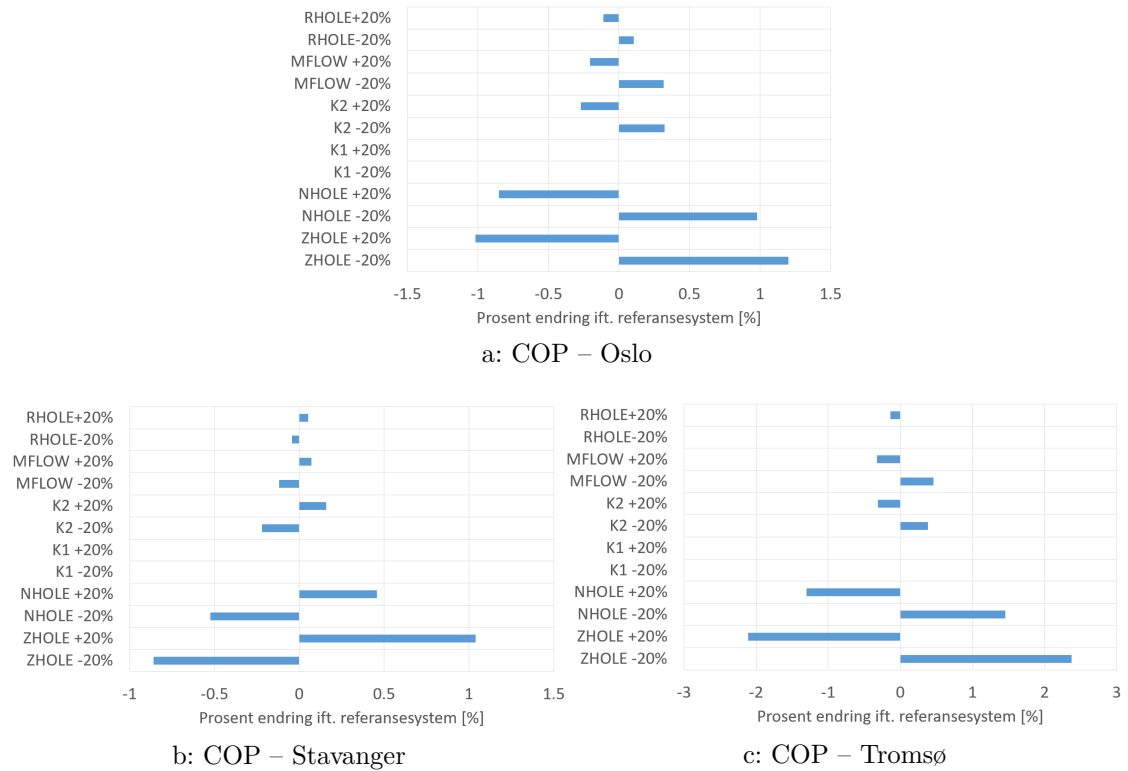
b: COP – Stavanger

c: COP – Tromsø

For COP ser man liknende trend for Oslo og Tromsø, mens for Stavanger råder en noe motsatt trend. Ved Stavangerklima viser det seg at COP øker ved økning av borehullslengde og -antall samt for økning av massestrøm. For Oslo og Tromsø reduseres COP ved de samme tiltakene. Dette har sammenheng med endring i forholdet mellom energikonsum i kompressoren og endring i avgitt varmeenergi fra kondenseren. Resultatene viser at kompressorenergi og avgitt energi fra kondenseren reduseres ved reduksjon av parameterverdiene for Oslo og Tromsø. Ved økning av parameterverdier øker også energikonsum i kompressoren og avgitt energi i kondenseren. For Stavanger gjelder det et økt energikonsum til kompressor og redusert varmeavgivelse fra kondenseren ved reduksjon av de samme parameterverdiene. Likning 3 tatt i betraktning, følger det at en større negativ endring i kompressorenergi enn kondenserenergi vil medføre redusert COP. Videre gjelder det at de samme parameterendringene som gir lite utslag på energi i borehull og til topplast og kompressor, også gir lite utslag på COP. Samlet sett er det liten endring i COP for både Oslo- og Stavangerklima, men noe større endringer for Tromsøklime.

I likhet med energibetrakningen er det utarbeidet tornadodiagram for sammenlikning av relativ endring i COP. Se Figur 30.

Figur 30: COP – relativ endring.



I Figur 30 ser vi samme forskjell i retning COP endrer seg for Stavanger og de to andre undersøkte lokasjonene. Her også vises en større endring for Tromsøklima enn ved Osloklima. Størst utslag gjør endring på borehullenes lengde, etterfulgt av antall og massestrøm som tidligere diskutert.

Tornado-diagram for 10% parameterendring viser resultater med lik profil som for 20% endring, men i mindre grad. Disse grafene kan sees i Vedlegg B.3.

4.5 Optimalisering

Optimaliseringen gjennomført ved hjelp av GenOpt er *single objective*, altså optimaliserer man bare én variabel. Ved optimalisering av flere variable (*multi objective optimization*) kan man benytte vektning av de ulike variablene. GenOpt muliggjør ikke dette. Resultater for optimalisert energibruk sammenliknet med energibruk i referansesystemet for de respektive lokasjonene vises i Tabell 8.

Tabell 8: Resultat – energioptimalisering.

Sted	Referansesystem [kWh/år]	Energioptimalt system [kWh/år]
Oslo	20741	16127
Stavanger	17153	16290
Tromsø	27193	23939

For samtlige lokasjoner ser man redusert energiforbruk etter simulering i GenOpt. Et allerede godt utgangspunkt (passivhus) begrenser reduksjon i energikonsum sammenliknet med andre konvensjonelle bygg. Likevel viser resultatene reduksjon i energikonsum. Størst er differansen for Oslo, hvor man reduserer det årlige energiforbruket med 4614 kWh. For Stavangerklima vises det lite endring, 863 kWh, mens man ved Tromsøklima reduserer med 3254 kWh.

Parameterverdier ved optimalisering er gitt i Tabell 9.

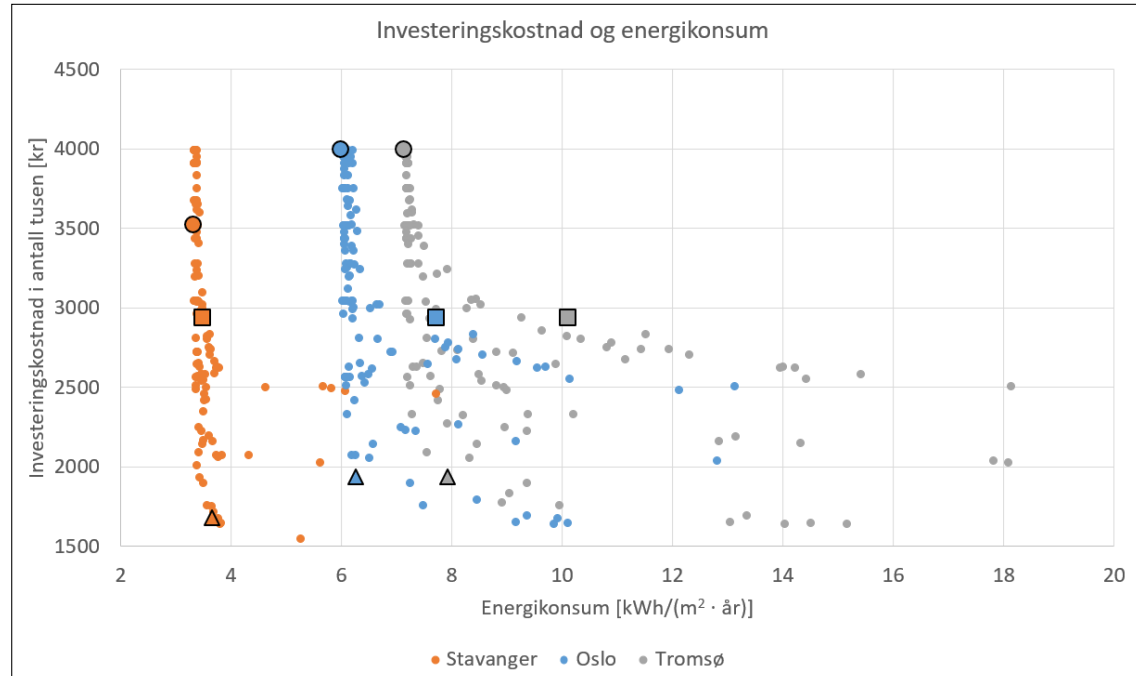
Tabell 9: Parameterstørrelser ved energioptimalisering.

Lokasjon	Oslo	Stavanger	Tromsø
ZHOLE [m]	400	400	400
NHOLE [m]	20	20	20
MFLOW [kg/s]	5	3	5
RTANK [m]	1	0.2	1
U-verdi [$W/(m^2 \cdot K)$]	0.6	0.7	0.6

For optimalt energikonsum favoriserer GenOpt maksimale størrelser for borehullslengde og -antall, massestrøm og tankvolum for Oslo- og Tromsøklima. Store verdier på disse parameterne bidrar til minimalt energiforbruk på hver sin måte. Dype og mange borehull muliggjør større opptak og tilførsel av energi i grunnen. Stor massestrøm øker varmeoverføring til og fra grunnen (jr. Likning 16). GenOpt favoriserer også lav U-verdi for vinduer, da den reduserer varmetap. Det er naturlig å finne et lavere energikonsum ved lav U-verdi i et kaldt klima, da varmebehovet er høyere enn kjølebehovet over året. For Stavangerklima viser GenOpt andre optimale parametere for minimal energibruk. Antall borehull og dybden på dem er lik som ved Oslo- og Tromsøklima, men for massestrøm, tankradius og U-verdi er verdiene endret. En U-verdi på $0,7 W/(m^2 \cdot K)$ viser seg mest optimal, hvilket kan sees i sammenheng med et større varmeoverskudd sammenliknet med Oslo og Tromsø. Det er heller ikke nødvendig å akkumulere store mengder varme i Stavanger, derav lavere tankvolum, trolig grunnet lavere varmebehov i bygningskroppen.

4.5.1 Økonomisk betraktning

For å undersøke hvordan optimalisering påvirker investeringskostnader plottes simuleringsresultater for energibruk som funksjon av investeringskostnader, se Figur 31.



Figur 31: Energikonsum versus investeringskostnader.

Resultater for energioptimalt system er markert med sort ring rundt punktene i Figur 31, referansesystemets resultater vises ved kvadrater og avveid systemløsning er representert av trekantsymboler. Referansesystemet har tydelig forskjell i energiforbruk ved de ulike stedene. Dette er et forventet funn ettersom simulering på de ulike lokasjonene hensyntar klima. Figuren viser at optimalisering av energikonsum (minimering) fører til økte investeringskostnader. Dette er i samsvar med funn i studiene utført av Karmellos et al. (2015) og Harkouss et al. (2018), som henholdsvis viser at investeringskostnader og livssyklus-kostnader øker ved energioptimalisering.

Figur 31 viser en konsentrasjon av resultater ved lavt energikonsum. Dette skyldes at GenOpt gir resultater basert på rollen man ønsker for resultatet. Som beskrevet i delkapittel 3.6 settes rollen for energikonsum til minimum. Trendene er noenlunde lik for alle lokasjoner. Stavanger skiller seg ut ved at energioptimalt system ikke har den høyeste investeringskostnaden. Dette skyldes at man behøver en mindre dimensjon på topplasten i Stavanger, da grunnlasten dekker omtrent alt effekt- og energibehovet. Topplasten bidrar maksimalt med 21 kW i Stavanger. Til sammenlikning dimensjoneres denne til 104 kW og 98 kW for henholdsvis Oslo og Tromsø.

Mer kostnadsoptimale alternativer er markert i Figur 31 med trekantsymbol. Disse er ikke eksakte optimale punkter, men befinner seg lavt til venstre i punktdiagrammet, hvilket medfører at de er gode alternativer både med hensyn på investeringskostnader og energikonsum. Disse punktene betraktes som en avveining mellom energikonsum og investeringskostnader.

Tabell 10 viser oversikt over energi- og kostnadsbesparing ved de ulike alternativene for de forskjellige klimastedene.

Tabell 10: Avveining – Energi og kostnad.

Sted	Energioptimalt system		Avveid systemløsning	
	Energikonsum	Investeringskostnad	Energikonsum	Investeringskostnad
Oslo	6	3994	6,3	1934
Stavanger	3,3	3519	3,7	1677
Tromsø	7,1	3994	7,9	1934

Energikonsum er oppgitt i $kWh/(m^2 \cdot \text{år})$.

Investeringskostnad er oppgitt i antall 1000 kr.

Resultatene i Tabell 10 viser at en avveining mellom energikonsum og investeringskostnader kan halvere investeringskostnader ved å godta en økning på $0,3 kWh/(m^2 \cdot \text{år})$ for Oslo klima. Tilsvarende for Stavanger halveres investeringskostnadene ved økt energikonsum på $0,4 kWh/(m^2 \cdot \text{år})$. For Tromsø øker energikonsumet med $0,8 kWh/(m^2 \cdot \text{år})$ ved halvering av investeringskostnadene. Dette viser at man kan oppnå relativt store besparelser i investeringskostnader ved å tillate en liten økning i årlig energikonsum. De avveide løsningene innebærer parameterstørrelser som beskrevet i Tabell 11:

Tabell 11: Parameterstørrelser – avveid systemløsning.

Lokasjon	Oslo	Stavanger	Tromsø
ZHOLE [m]	400	180	400
NHOLE [m]	6	6	6
MFLOW [kg/s]	4	3	4
RTANK [m]	1	0,9	1
U-verdi [$W/(m^2 \cdot K)$]	0,8	0,8	0,8

Til motsetning fra ved energioptimalisering (Tabell 9) medfører de avveide løsningene færre borehull ved alle klimastedene, og for Stavanger klima kortere borehull. Massestrømmen senkes for Oslo- og Tromsø klima, men akkumuleringstankenens radius (og dermed volum) opprettholdes. Ved Stavanger klima øker akkumuleringsvolumet for avveid systemløsning sammenliknet med energioptimal løsning. U-verdi for vinduer er 0,8 for alle steder. Avveiningene er gjort basert på punktdiagrammenes trend.

4.6 Feilkilder

Ved visualisering av temperatur i grunnen (jf. Figur 19) er liten grad av nøyaktighet benyttet. Dette skyldes begrensninger i maskinvare som diskutert under resultater. Økning i oppløsning, hvilket medfører mer nøyaktig visualisering av resultatene, gjør programvaren, IDA ICE, lukkes uten forvarsel. Om dette skyldes mangel på datakraft eller feil i programvaren akkurat for animasjonfunksjon er uvisst. Liknende problemer oppstår ved simulering av lange perioder. Simuleringene lar seg gjøre, men fremstilling av resultater er problematisk dersom tallmaterialet er for stort. Dette antas å skyldes maskinvarens begrensninger. Ved simulering av for eksempel 25 år, tar simuleringen omtrent ett døgn å gjennomføre. Denne lange simuleringstiden begrenser antall ganger man kan forsøke og feile for å få dette til å fungere. For å visualisere resultatene etter simulering åpnes en fil hvor ønskede variabler er logget, men typisk lukkes programvaren før resultatene kan vises.

I SD-anlegget hvor data for temperatur, massestrøm og effekt er hentet, har det vært flere perioder med nedetid i 2018. Ved nedetid i instrumenter for måling eller logging får loggede parametere enten verdiene 0 eller uteblir fra loggen. Det foreligger en inkonsekvens i SD-anleggets behandling av data ved nedetid, da enkelte punkter uteblir og andre får verdien 0. For behandling av data i dette prosjektet behandles verdiene som 0, og utgjør dermed en feilkilde. Det foreligger også en feilkilde i betraktning av målt effekt. Energimåleren angir ikke hvorvidt effekten som beregnes er for kjøle- eller varmedrift. Dermed har fortegn blitt anslått ved bruk av simuleringresultater slik at dersom simuleringer tilsier kjøledrift, betraktes målt effekt for samme tidspunkt som negativt. Ved en slik fremgangsmåte bør resultatene betraktes med stor grad av forsiktighet.

Bygningmodellen som benyttes i dette prosjektet er forenklet. Dette utspiller seg i modellens innhold, for eksempel ved at den ikke inneholder alle romkategorier og internlaster som finnes i faktiske bygg. For eksempel er det ikke implementert teknisk rom hvor mye varme genereres. I tillegg er en forenkling gjort ved implementering av vinduer. I realiteten monteres flere vinduer med tilhørende karm og ramme, og i modellen er det implementert ett stort vindu for hver himmelretning og etasje. Dette gjøres for å minimere simuleringstid og arbeidsmengde. Utvendige dører og vinduer antas å være lukket til enhver tid og innvendige dører antas å alltid være åpne. Dette er forenklinger som kan påvirke blant annet temperatur og energibruk i sonene. For beregninger med høy presisjon bør bygningsmodeller med stor grad av nøyaktighet benyttes. Stor grad av nøyaktighet i simuleringer vil kreve større mengder datakraft. Ved simulering av avanserte og detaljerte modeller anbefales bruk av kraftige datamaskiner.

Det foreligger også feilkilder i flere av input-verdiene for simulering. Alle usikre verdier utgjør en potensiell feilkilde. For simulering må verdier for borehullenes mange fysiske egenskaper implementeres. Verdier for disse er hentet fra ulike kilder. Ved Powerhouse Kjørbo består grunnen av bergarten Syenittporfyr, skal man tro NGU (Norske geologiske undersøkelser, 2015). Termiske egenskaper for denne bergarten er hentet fra nettstedet Comparenature (Comparenature, u.d.). Det er også en forenkling å anta at hele grunnen består av samme type materiale (som IDA ICE operer med), som har like fysiske og termiske egenskaper over hele borehullslengden. Tetthet, porøsitet, varmekonduktivitet og -kapasitet kan endre seg dersom det finnes andre materialer i grunnen.

Det er benyttet kollektorslanger av typen PE100. Verdier for input i simuleringmodellen er spesifikk varmekapasitet, termisk konduktivitet og ruhet. Verdier for disse størrelsene er hentet fra henholdsvis Chang & Bestul (1973), Engineering Toolbox (2003c) og Pipeflow (u.d.). Disse verdiene avhenger av utførelse i produksjon og installasjon. Det at man henter informasjon fra flere ulike kilder utgjør også en mulig feilkilde ettersom ulike aktører kan ha ulike utgangspunkt

for sine opplysninger. Det samme gjelder for innhenting av informasjon til andre parametere.

Som forklart i delkapittel 3.1 foreligger det en feil i programvaren ved implementering av termisk motstand i borehull. Om man hadde fått mer nøyaktige resultater ved bruk av denne funksjonen forblir uvisst da forsøk ikke lar seg gjøre med tilgjengelig programvare. Ifølge datablad for energimålere (Kamstrup Multical 801) måles effekt med hensyn på varmekoeffisient for vann. Ved Powerhouse Kjørbo benyttes HX35 som varmbærer, hvilket tyder på at det foreligger en feilkilde i måledata. Databladet beskriver beregningsmetoden for effekt, som vist i Formel 17.

$$P = q \cdot (T_1 - T_2) \cdot k \quad (17)$$

Hvor:

- P er målt effekt
- q er volumstrøm
- T_1 og T_2 er temperatur for inn- og utløp
- k er vannets varmekoeffisient

Vannets varmekoeffisient k angis i enheten $kWh/(m^3 \cdot K)$ og beregnes etter OIML R 75-1, som er en internasjonal anbefaling for måling- og beregningsmetoder utgitt av International Organization of Legal Metrology i Frankrike. Beregning for k er gitt av Likning 18:

$$k = \frac{1}{v} \cdot \frac{h_f - h_r}{\Theta_f - \Theta_r} \quad (18)$$

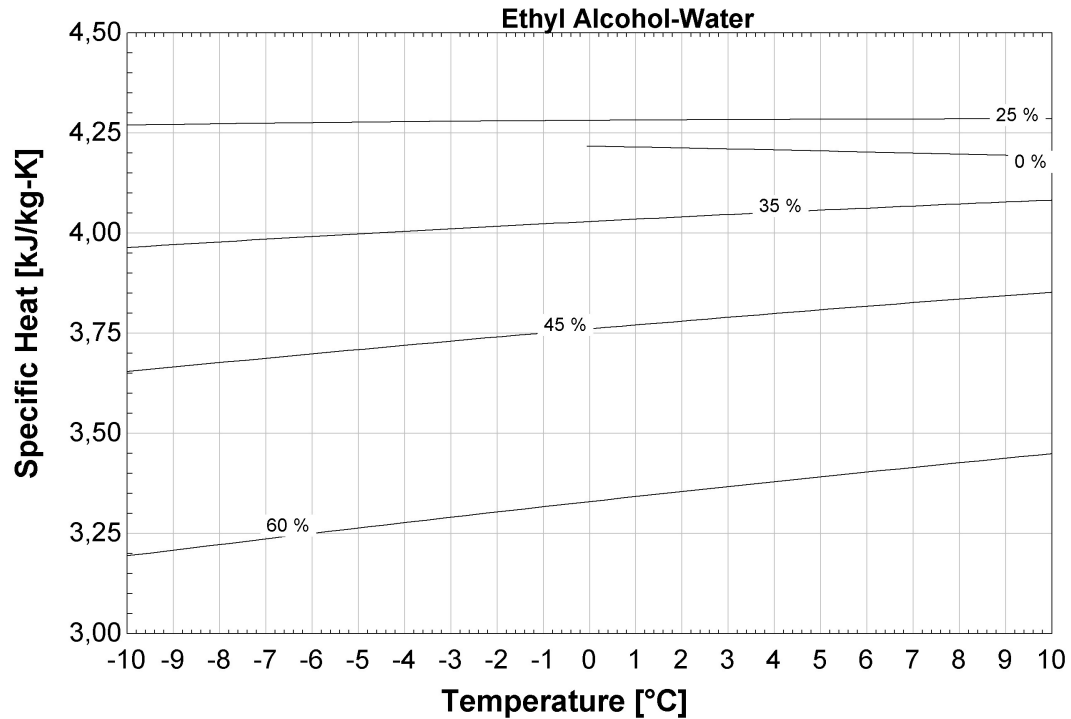
Hvor:

- k er varmekoeffisient
- v er spesifikt volum
- h_f og h_r er mediets entalpi for henholdsvis tur og retur
- Θ_f og Θ_r er mediets temperatur for henholdsvis tur og retur.

Verdiene for variablene i Likning 18 er hentet fra *The Industrial Standard for the Thermodynamic Properties of Water and Steam* (IAPWS-IF 97). Ved å benytte tilsvarende verdier for entalpi og spesifikt volum for aktuelt medium, kan varmekoeffisient for andre medier enn vann beregnes. Denne jobben foreslås til videre arbeid.

Optimalt kunne mediets endrede varmekapasitet vært tatt i betraktning. Det er kjent at varmekapasiteten for vann ikke er konstant, men tilnærmet konstant ved lave temperaturforskjeller (Engineering Toolbox, 2004). For ytterligere forbedring i beregning av termisk effekt kunne denne sammenhengen vært implementert, men "gevinsten" av dette er sannsynligvis lav ettersom verdiene for varmekapasitet varierer relativt lite i intervallet som undersøkes her.

Figur 32 viser endring i varmekapasitet i etanol-vannblandinger med ulik konsentrasjon som funksjon av temperatur. Figuren er fremstilt ved hjelp av programvaren *Engineering Equation Solver*.



Figur 32: Spesifikk varmekapasitet – Etanol-/vannblanding.

For HX35, hvor blandingen inneholder 35% etanol, kan man se at varmekapasiteten har en differanse på omtrent $0,1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ mellom -5°C og $+10^\circ\text{C}$. Dette vil utgjøre lite avvik i effektberegningen.

5 Konklusjon

I dette kapittelet besvares forskningsspørsmål og det redegjøres for problemstillingens løsning.

Målet med denne oppgaven var å validere resultater fra IDA ICE ved bruk av borehullstillegget, samt å belyse hvilke parametere som har påvirkning på energioptak og -konsum og i hvilken grad disse medvirker ved ulike klimasteder. Til sist undersøkes potensialet for energisparing i referansesystemet ved de ulike klimastedene, ved hjelp av IDA ICE og GenOpt. Problemstillingen løses ved å besvare forskningsspørsmålene presentert i introduksjonskapittelet.

Validering

Det første forskningsspørsmålet omhandler hvor godt simuleringresultater fra borehullstillegget i IDA ICE samsvarer med målte verdier.

Resultatene fra validering med hensyn på temperatur i varmekarers massestrøm ut fra borehullet samsvarer godt med målte verdier, med $R^2 = 0,96$ og $CV_{RMSE} = 0,07$. Det råder lite avvik til tross for gjennomsnittsberegning fra minuttmålinger til timesverdier på logget data. For validering med hensyn på termisk effekt viser resultatene stort avvik og dermed mindre grad av nøyaktighet for resultatene. For termisk effekt viser resultater $R^2 = 0,8$ og $CV_{RMSE} = 2,44$. Det store avviket ved validering med hensyn på termisk effekt skyldes forenklinger og antakelser ved beregning av simulert effekt.

Borehullstillegget i IDA ICE er validert med hensyn på temperatur og viser tilfredsstillende sammenheng mellom målte og simulerte verdier. For validering med hensyn på termisk effekt gav ikke anvendt metode tilfredsstillende resultater.

Sensitivitetsanalyse

Det andre forskningsspørsmålet krever svar på hvilke parametere som har størst påvirkning på energioptak i grunnen ved bruk av energibrønner.

Resultater fra sensitivitetsanalyser viser at parametere med størst innvirkning på energi i grunnen er antall borehull, borehullenes lengder og massestrøm på varmekarere. De samme parametere gjelder for størst innvirkning på energikonsum i topplast og varmepumpens kompressor. Borehullslengde er parameteren med størst påvirkning, etterfulgt av antallet borehull. Av disse parametere er det massestrøm som har minst påvirkning på energioptak og -konsum. Påvirkningen viser seg størst i områder med kaldere klima; for Tromsøklime vises større påvirkning av endringer i parameterverdier enn for Osloklime.

Optimalisering

Det tredje og siste forskningsspørsmålet gjelder energisparing ved optimalisering av referansesystem for de ulike klimastedene.

Optimalisering viser at det finnes forbedringspotensiale med hensyn på energibruk for referanseanlegg ved samtlige klimasteder betraktet i dette prosjektet. Differanse i årlig energibruk mellom referansesystem og optimalisert system er størst ved Osloklime (4614 kWh), etterfulgt av Tromsø (3154 kWh) og Stavangerklime (863 kWh). Investeringskostnader øker ved energioptimalisering, og man må gjøre en avveining mellom kostnader og energibesparelse ved valg av systemparametere på grunn av størrelsenes sammenheng. Energikonsum lar seg ikke minimere uten at det medfører økning i investeringskostnad. Det viser seg at man kan halvere investeringskostnader ved å akseptere en relativt liten økning i energikonsum. For Oslo, Stavanger og Tromsø halveres investeringskostnader ved tillatt økning i energikonsum på $0,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$, $0,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ og $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$, respektivt.

6 Forslag til videre arbeid

Hvor godt IDA ICE beregner termisk effekt i forhold til målte verdier forblir uvisst etter dette prosjektet, da utstyr og metode medfører usikre resultater. Det foreslås dermed at borehullstillegget valideres med hensyn på termisk effekt i grunnen i videre arbeid. Da følger det at usikre aspekter bør minimeres til forskjell fra dette prosjektet, gjerne ved bruk av funksjonen *Response Test* for implementering av termisk motstand i borehullet. Da inngår færre usikre momenter enn det gjelder for dette prosjektet. Det foreslås også å foreta nødvendige målinger med kalibrert utstyr for ytterligere økt grad av nøyaktighet. Valideringsresultater fra IDA ICE kan også sammenliknes med annen programvare. Validering med hensyn på flere ulike variabler bør gjennomføres systematisk. På den måten kan man finne styrker og svakheter ved ulike programmer til ulike formål.

Denne oppgaven betrakter et referansebygg hvor flere forenklinger er gjort. På grunn av begrenset tilgang på datakraft til simulering er modellene i denne oppgaven noe enkle. Dermed foreslås det å gjennomføre undersøkelser som sensitivitetsanalyse og optimalisering for mer innholdsrike og komplekse bygningsmodeller. Dette kan belyse nye resultater og problemstillinger denne oppgaven ikke omfatter.

Referanser

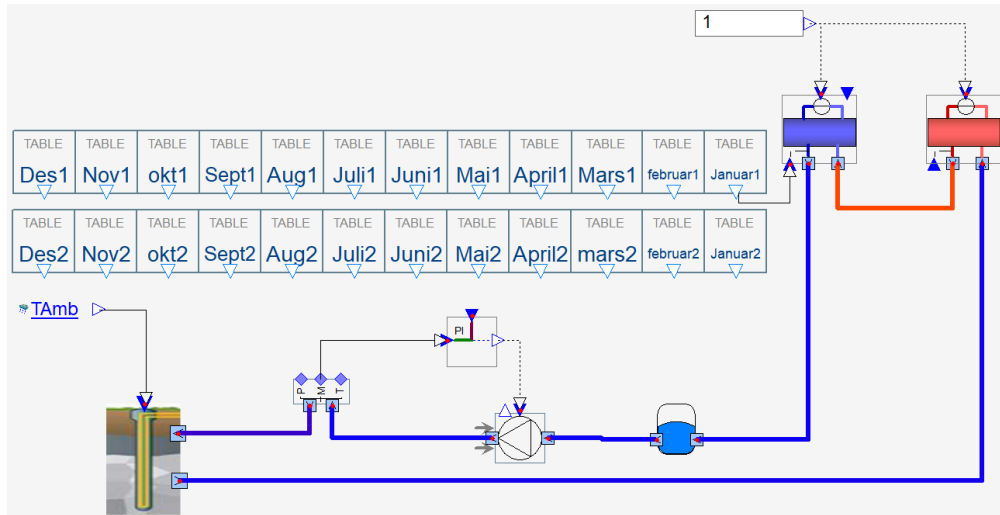
- ASHREA. (2002). *Measurement of energy and demand savings*. Hentet fra http://www.eepformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ashrae_guideline_14-2002_measurement_of_energy_and_demand_saving.pdf (Lest 02.05.2019)
- Ashrea fundamentals*. (2001). Hentet fra <https://sovathrothsama.files.wordpress.com/2016/03/ashrae-hvac-2001-fundamentals-handbook.pdf>
- Byggforsk. (2018). *Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring (451.021)*. Byggforskserien.
- Båsum boring AS. (u.d.). *En miljøvennligetanolbasert kuldebærer for varmepumper*. Hentet fra https://basum.no/wp-content/uploads/HX_brosjyreark-1.pdf (Lest 01.05.2019)
- Carrier. (u.d.). *Water-sourced liquid chillers/heat pumps with or without integrated hydronic module*. Hentet fra http://carrierab.se/media/49347/16121_psd_02_2012_61wg_30wg_lr.pdf (Lest 07.04.2019)
- Cengel, Y.A. & Boles, M.A. (2015). *Thermodynamics – an engineering approach* (8. utg.). McGraw-Hill Education.
- Cengel, Y.A. & Ghajar, A.J. (2015). *Heat and mass transfer – fundamentals & applications* (5. utg.). McGraw-Hill Education.
- Chang, S. & Bestul, A. (1973). Heat capacities of polyethylene from 2 to 360 k. Hentet fra https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/77A/jresv77An4p395_A1b.pdf (Lest 02.05.2019)
- Comparenature. (u.d.). *Properties of syenite*. Hentet fra <https://rocks.comparenature.com/en/properties-of-syenite/model-45-6> (Lest 01.05.2019)
- Direktoratet for Arbeidstilsynet. (2016). *Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen*. Hentet fra <https://www.arbeidstilsynet.no/contentassets/3f86f6d2038348d18540404144f76a22/luftkvalitet-pa-arbeidsplassen.pdf>
- Dokka, T.H., Berg, M.O. & Lillelien, E. (2011). *Underlagsmateriale for ns 3701*.
- Energyplus. (u.d.-a). *Energyplus*. Hentet fra <https://energyplus.net/> (Lest 07.05.2019)
- Energyplus. (u.d.-b). *Weather data sources*. Hentet fra <https://energyplus.net/weather/sources#IWECC> (Lest 18.03.2019)
- Engineering Toolbox. (2003a). *Specific heat of common substances*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html (Lest 02.05.2019)

- Engineering Toolbox. (2003b). *Thermal conductivity of common materials and gases*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html (Lest 02.05.2019)
- Engineering Toolbox. (2003c). *Thermal conductivity of common materials and gases*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html (Lest 02.05.2019)
- Engineering Toolbox. (2003d). *Water - density, specific weight and thermal expansion coefficient*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html (Lest 01.05.2019)
- Engineering Toolbox. (2004). *Water - heat capacity (specific heat)*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html (Lest 13.04.2019)
- Engineering Toolbox. (2006). *Iso 4427 - pe pipes for water supply - dimensions*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/pe-pipe-dimensions-d_321.html (Lest 02.05.2019)
- Engineering Toolbox. (2010). *Dirt and mud - densities*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/dirt-mud-densities-d_1727.html (Lest 02.05.2019)
- Engineering Toolbox. (2018). *Water - thermal conductivity*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/water-liquid-gas-thermal-conductivity-temperature-pressure-d_2012.html (Lest 01.05.2019)
- EQUA. (u.d.). *Ida indoor climate and energy*. Hentet fra <https://www.equa.se/en/ida-ice> (Lest 07.05.2019)
- EQUA. (2018). User manual – ida indoor climate and energy [programvarehåndbok]. EQUA Simulation AB.
- Forskning.no. (2002). *Hva er ozonlaget?* Hentet fra <https://forskning.no/klima-forurensning/hva-er-ozonlaget/1083518> (Lest 13.05.2019)
- Harkouss, F., Fardoun, F. & Biwole, P.H. (2018). Passive design optimization of low energy buildings in different climates. *Energy*, 165, 591–613.
- Hawking, S. (2011). *A brief history of time*. Transworld.
- Hong, T., Kim, C.-J., Jeong, J., Kim, J., Koo, C., Jeong, K. & Lee, M. (2016). Framework for approaching the minimum cv (rmse) using energy simulation and optimization tool. *Energy Procedia*, 88, 265–270.
- IBPSA-NORDIC. (u.d.). *Tools – mobo*. Hentet fra <http://ibpsa-nordic.org/tools.html> (Lest 09.05.2019)
- Karmellos, M., Kiprakis, A. & Mavrotas, G. (2015). A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. *Applied Energy*, 139, 131–150.

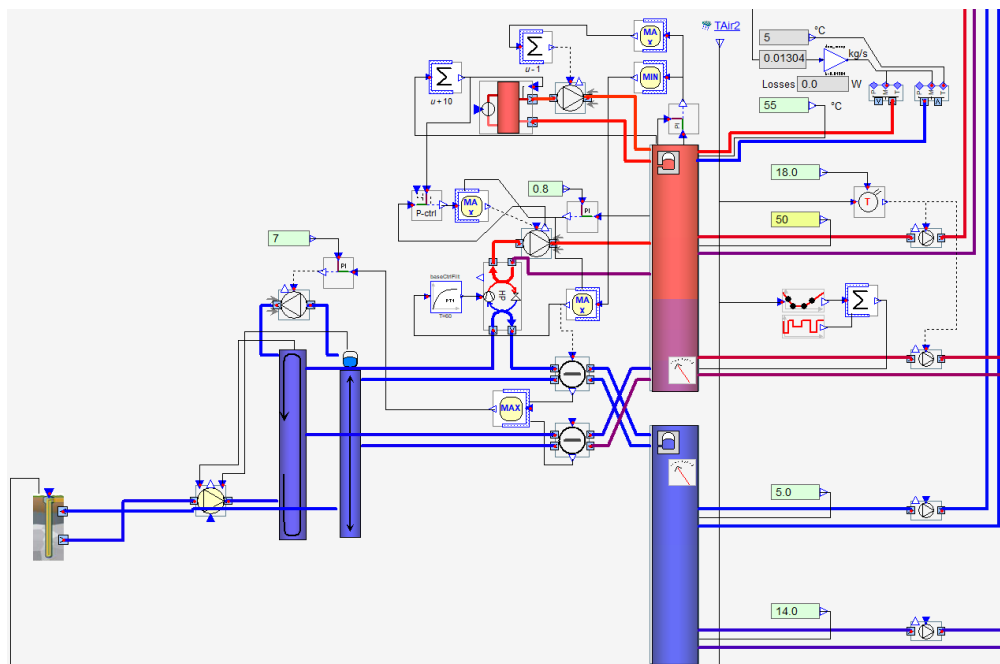
- Klimaloven. (2018). (LOV-2017-06-16-60)
(Hentet fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2017-06-16-60>)
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2016). *Genopt – generic optimization program*.
Hentet fra <https://simulationresearch.lbl.gov/G0/>
(Lest 07.05.2019)
- Melinder. (2007). *Thermophysical properties of aqueous solutions used as secondary working fluids*. Hentet fra https://www.researchgate.net/figure/Thermal-conductivity-of-ethyl-alcohol-water_fig22_267973400
(Lest 01.05.2019)
- Norges geologiske undersøkelse. (u.d.). *Grunnvarme*. Hentet fra <https://www.ngu.no/emne/grunnvarme>
(Lest 07.04.2019)
- Norges geologiske undersøkelse. (2015). *Tcn-sonde*. Hentet fra <https://www.ngu.no/emne/tcn-sonde>
(Lest 02.05.2019)
- Norsk Prisbok. (2019). Norconsult Informasjonssystemer AS and Bygganalyse AS.
- Norske geologiske undersøkelse. (2015). *Kart – berggrunn*. Hentet fra <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/>
(Lest 30.04.2019)
- NS 3031. (2014). *Beregning av bygningers energiytelse – metode og data*. (Standard Norge)
- NS 3701. (2012). *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – yrkesbygninger*. (Standard Norge)
- Pasquale, V., Verdoya, M. & Paolo. (2014). *Geothermics: Heat flow in the lithosphere*. Springer.
- Pipeflow. (u.d.). *Pipe roughness*. Hentet fra <https://www.pipeflow.com/pipe-pressure-drop-calculations/pipe-roughness>
(Lest 02.05.2019)
- Pipelife. (u.d.). *Pipelife produktdatabase*. Hentet fra <http://katalog.pipelife.no/dev/>
(Lest 02.05.2019)
- Powerhouse.no. (u.d.). *Om powerhouse*. Hentet fra <https://www.powerhouse.no/hva-er-et-powerhouse/>
(Lest 14.01.2019)
- Programbyggerne. (u.d.). *Simien*. Hentet fra <http://www.programbyggerne.no/>
(Lest 07.05.2019)
- Ringdal, K. (2014). *Enhet og mangfold* (3. utg.). Fagbokforlaget.
- Statistisk sentralbyrå. (2019). *Elektrisitetspriser*. Hentet fra <https://www.ssb.no/elkraftpris/>
(Lest 10.05.2019)
- TEK17. (2017). *Byggeteknisk forskrift*.
- Zijdemans, D. (2012). *Vannbaserte oppvarmings-og kjølesystemer*. Skarland Press.

Vedlegg

A Simuleringsmodeller – utklipp fra IDA ICE



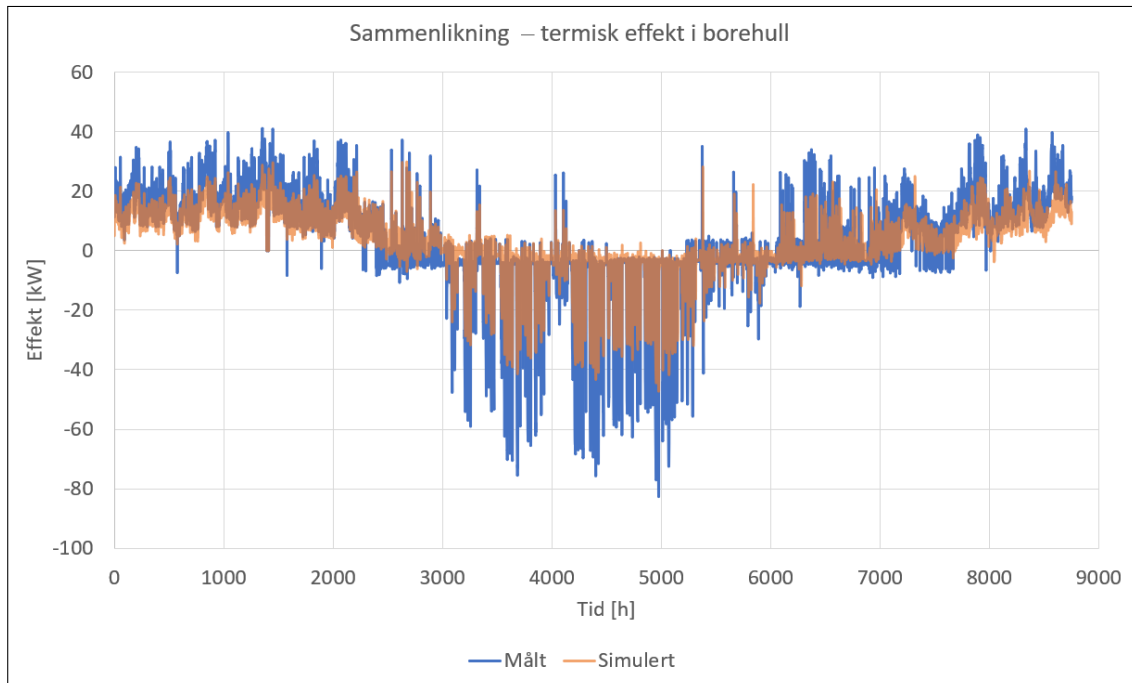
Figur 33: ESBO-anlegg benyttet for validering.



Figur 34: ESBO-anlegg benyttet for analyser.

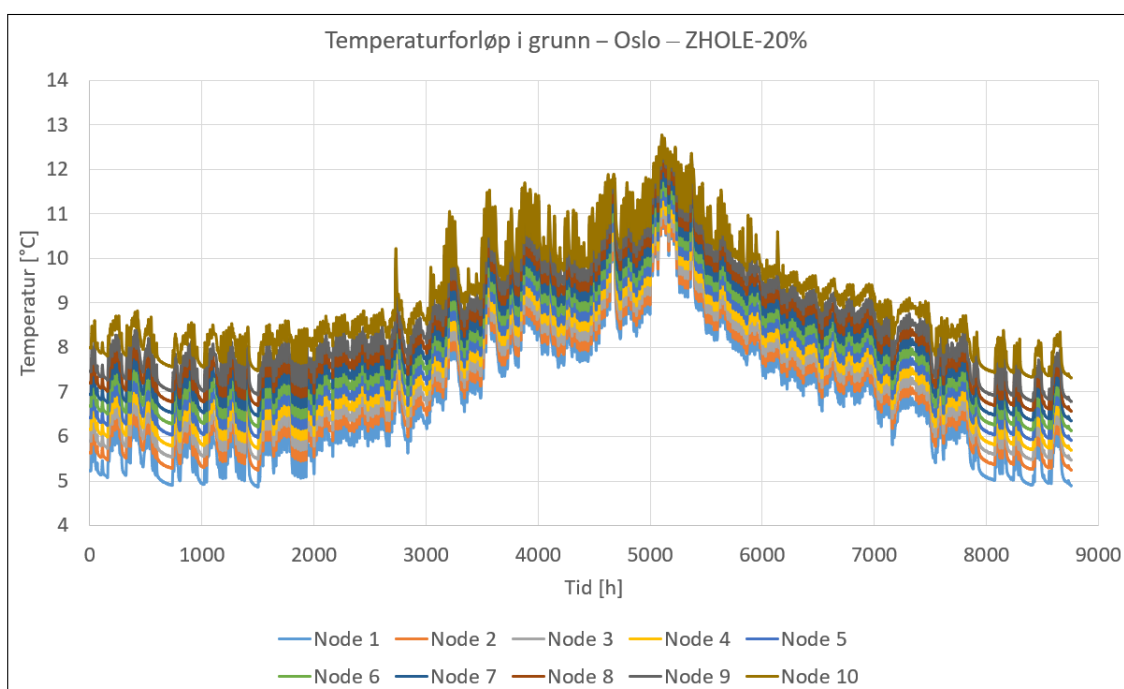
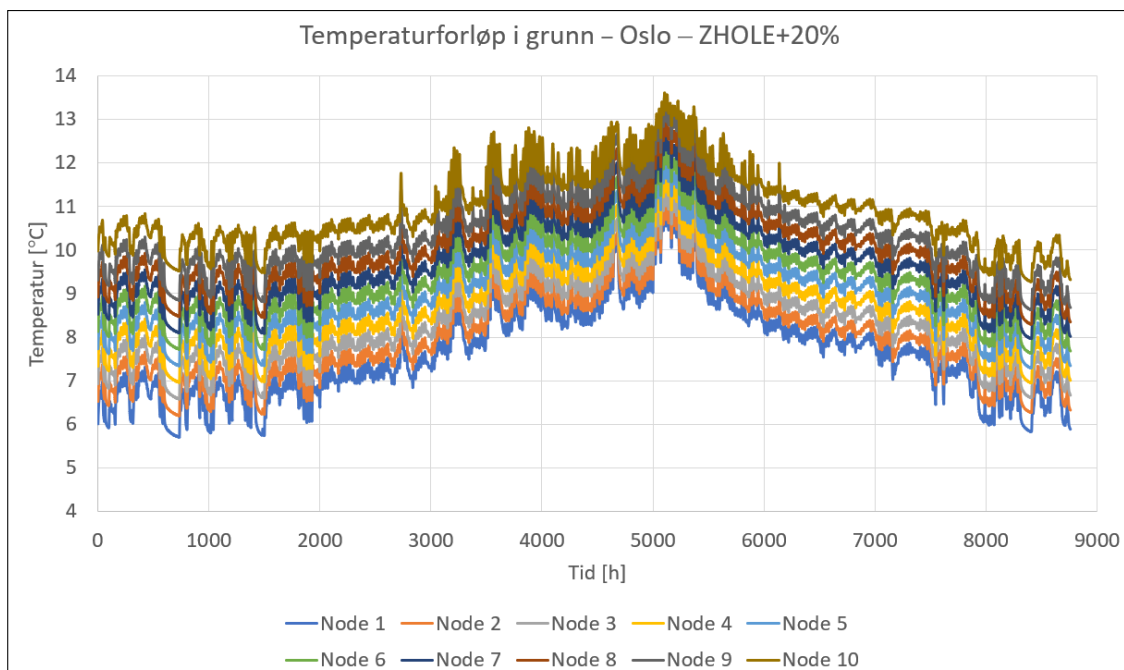
B Simuleringsresultater

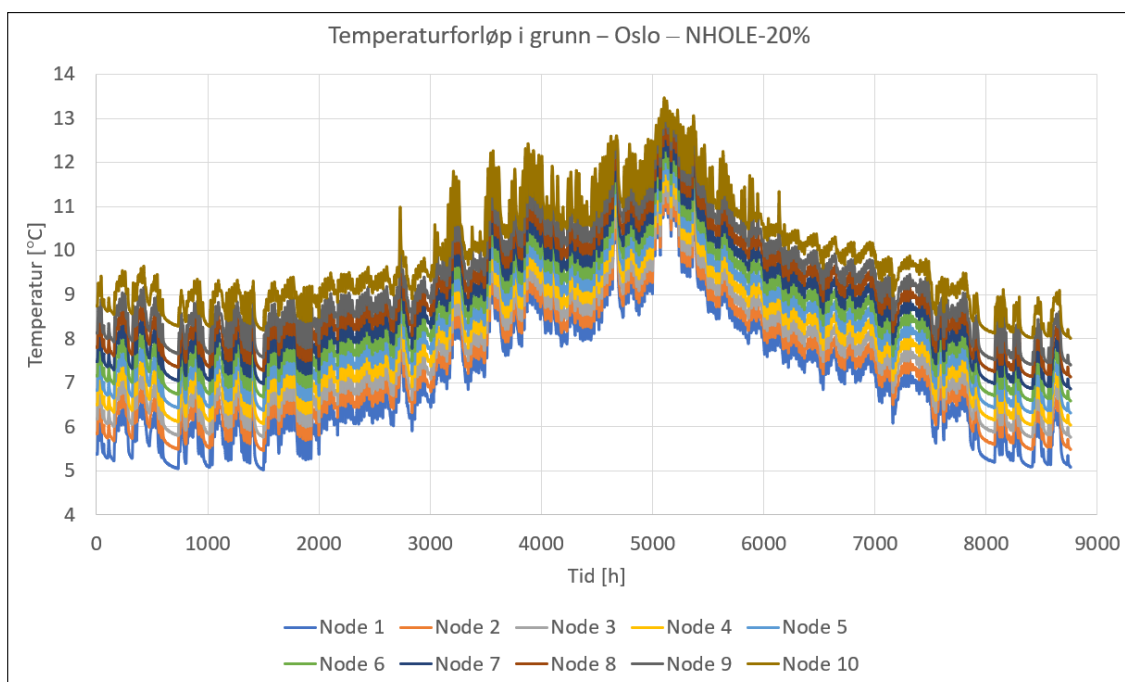
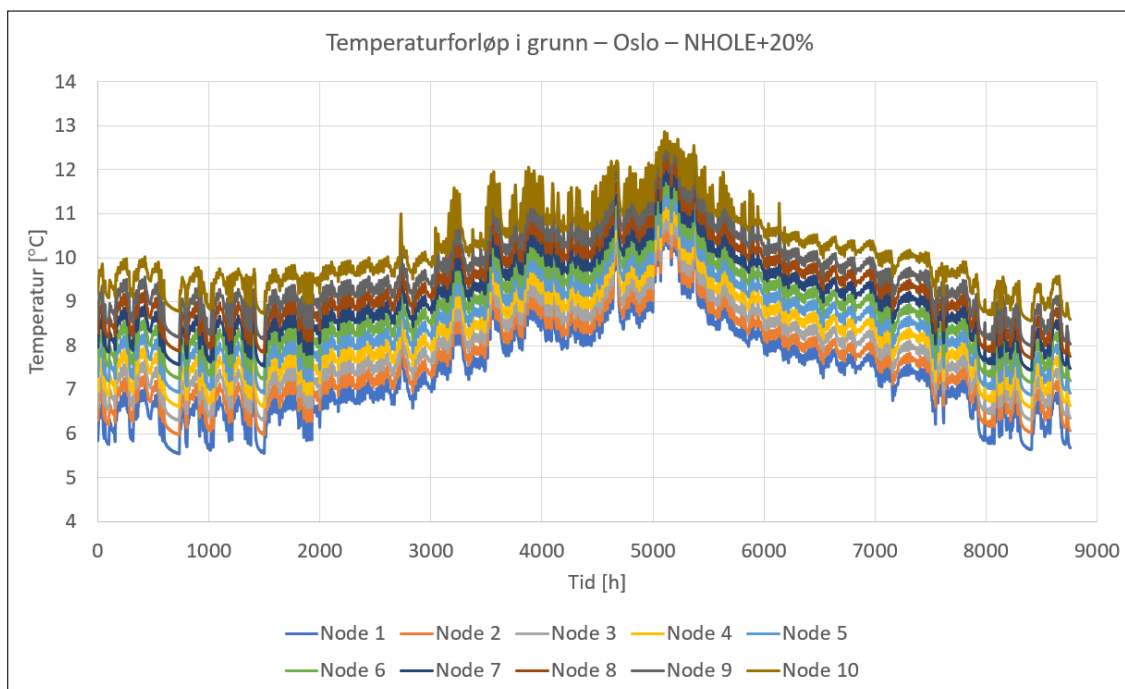
B.1 Termisk effekt i borehull

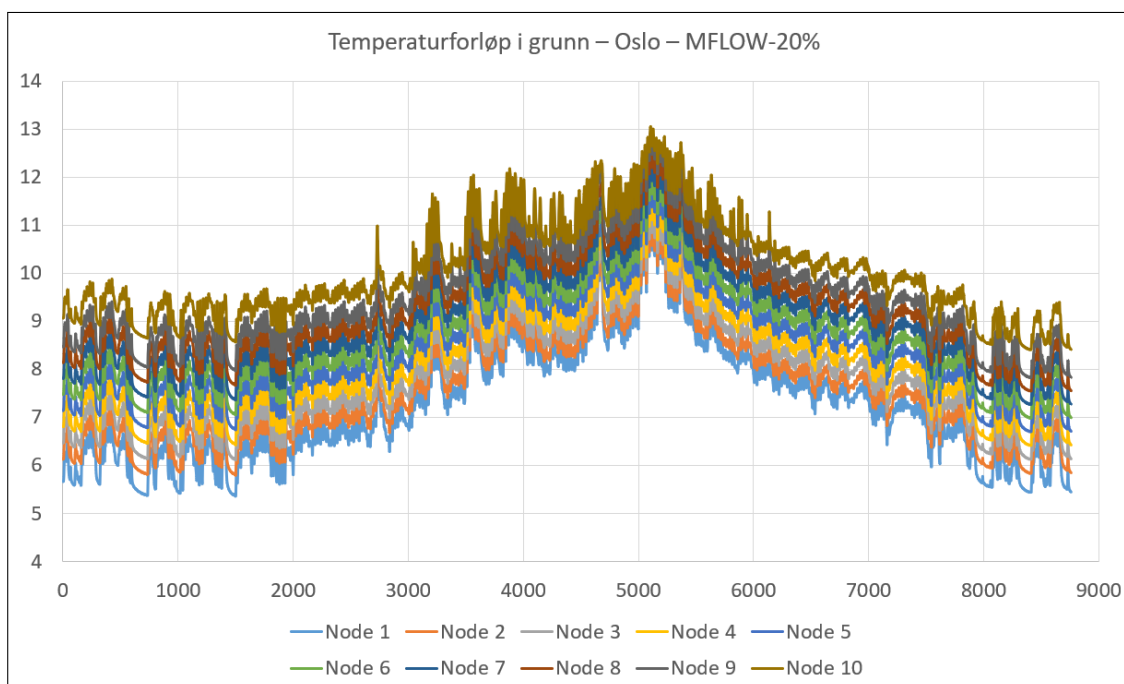
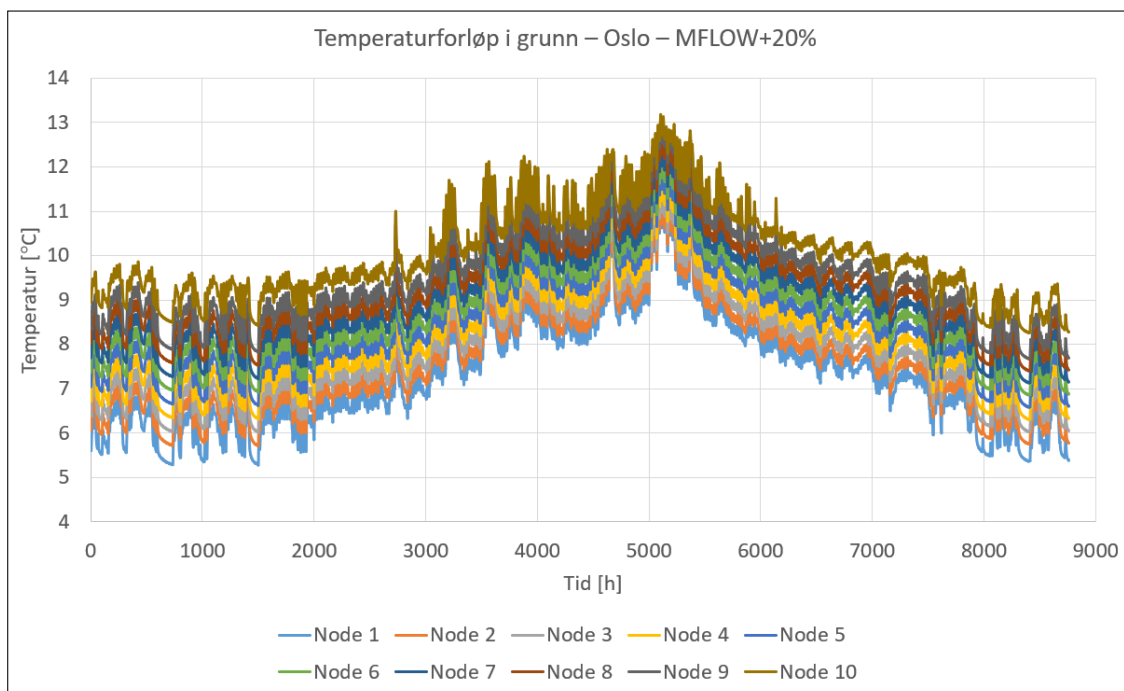


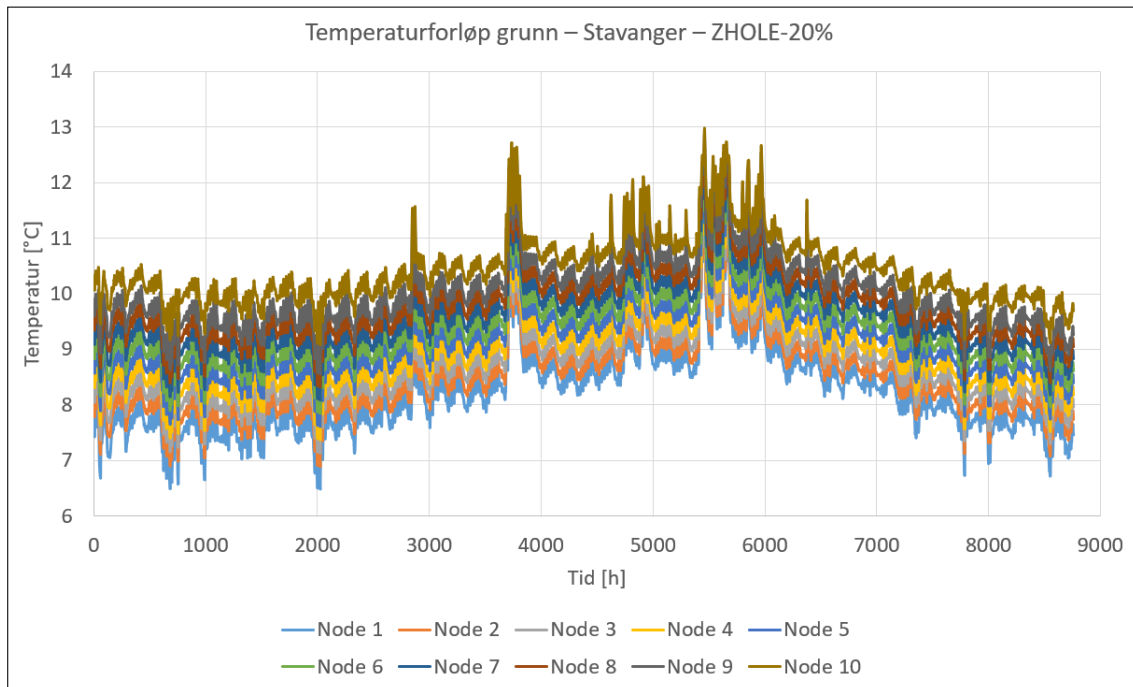
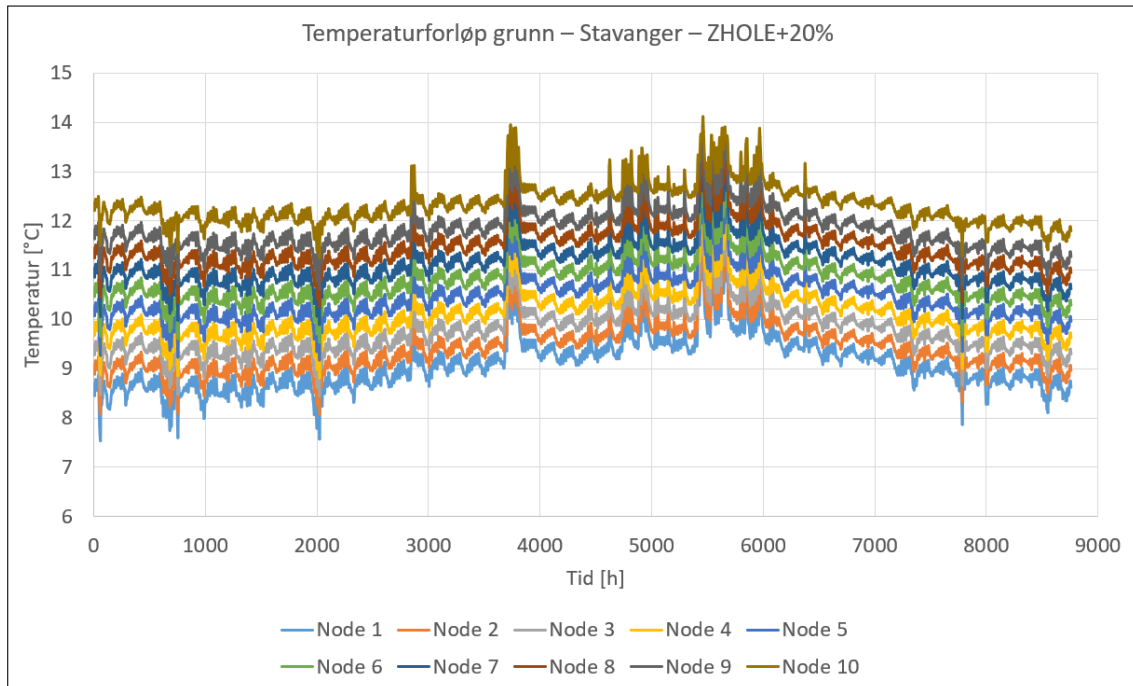
Figur 35: Sammenlikning av termisk effekt.

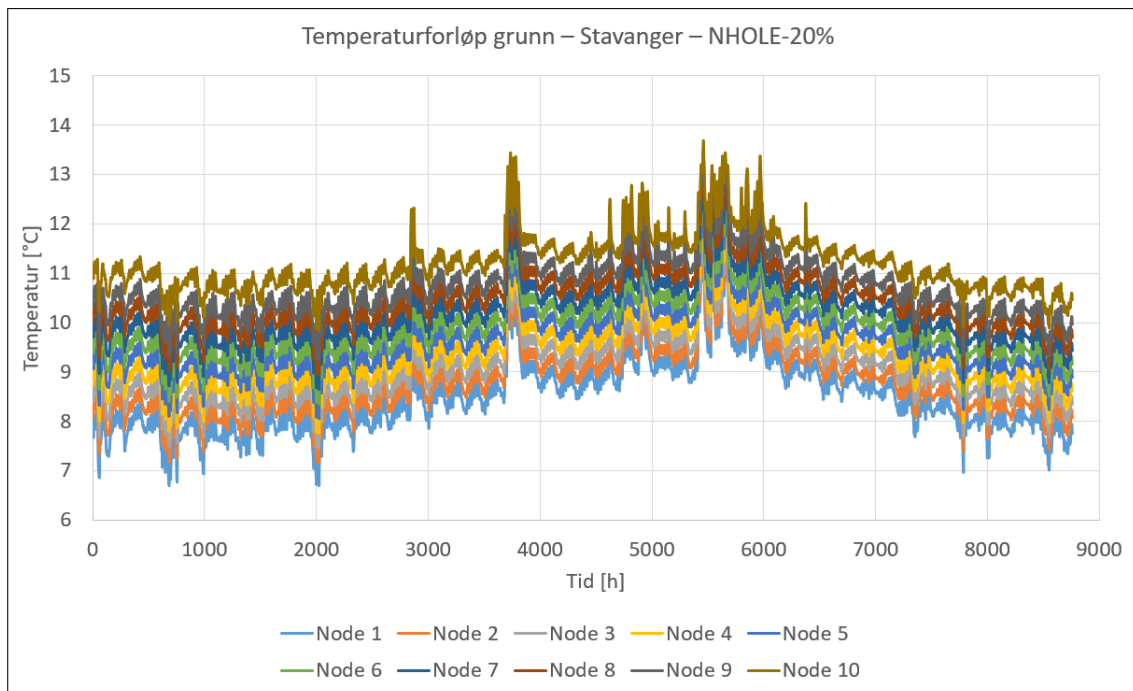
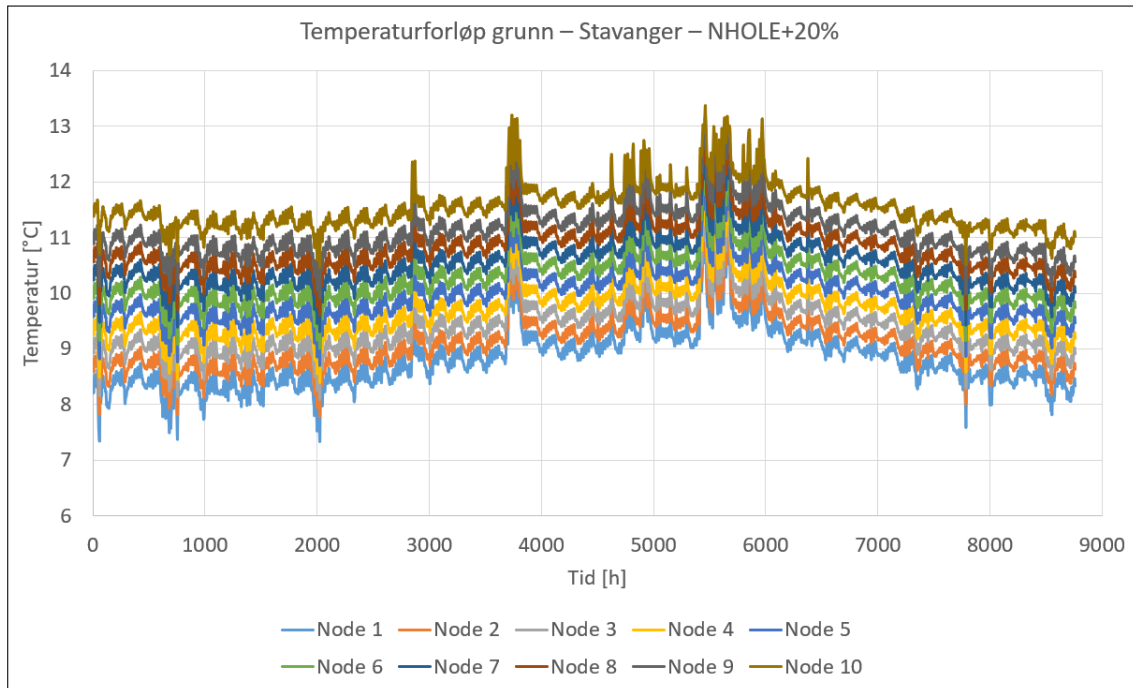
B.2 Temperaturforløp i grunn

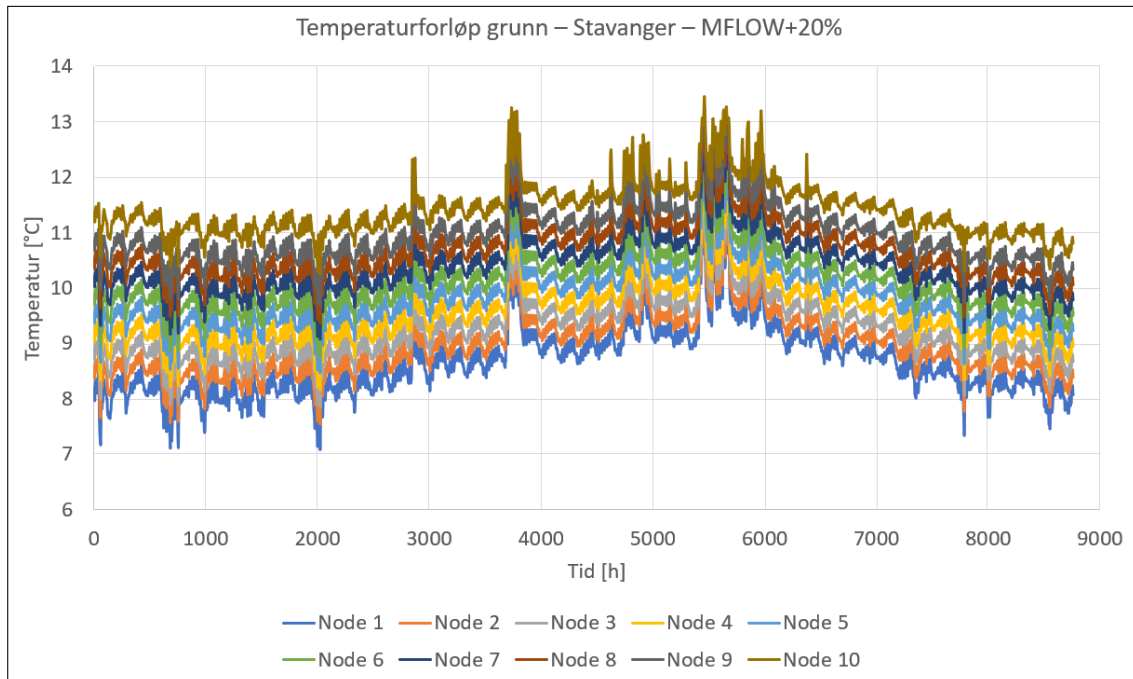
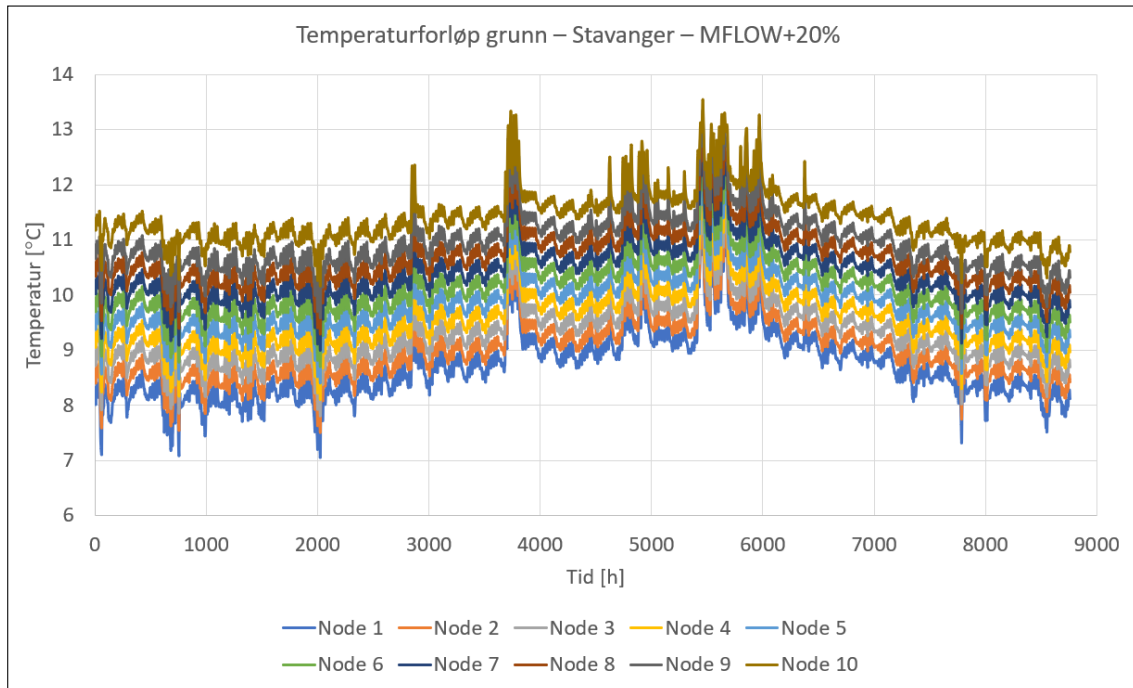


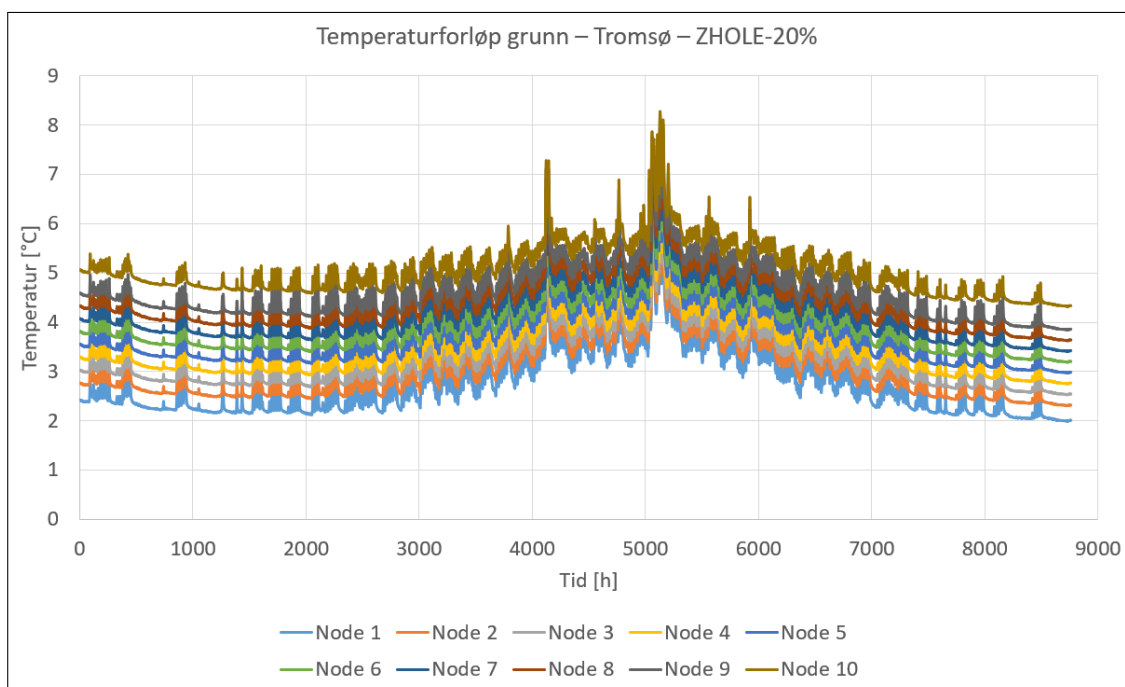
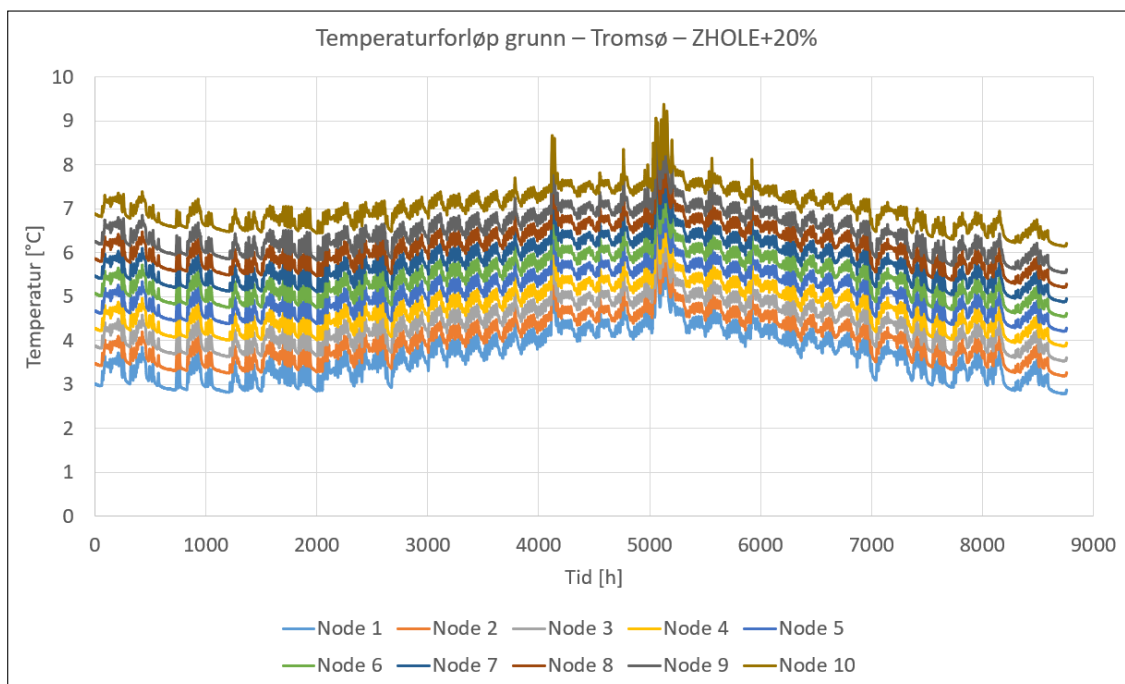


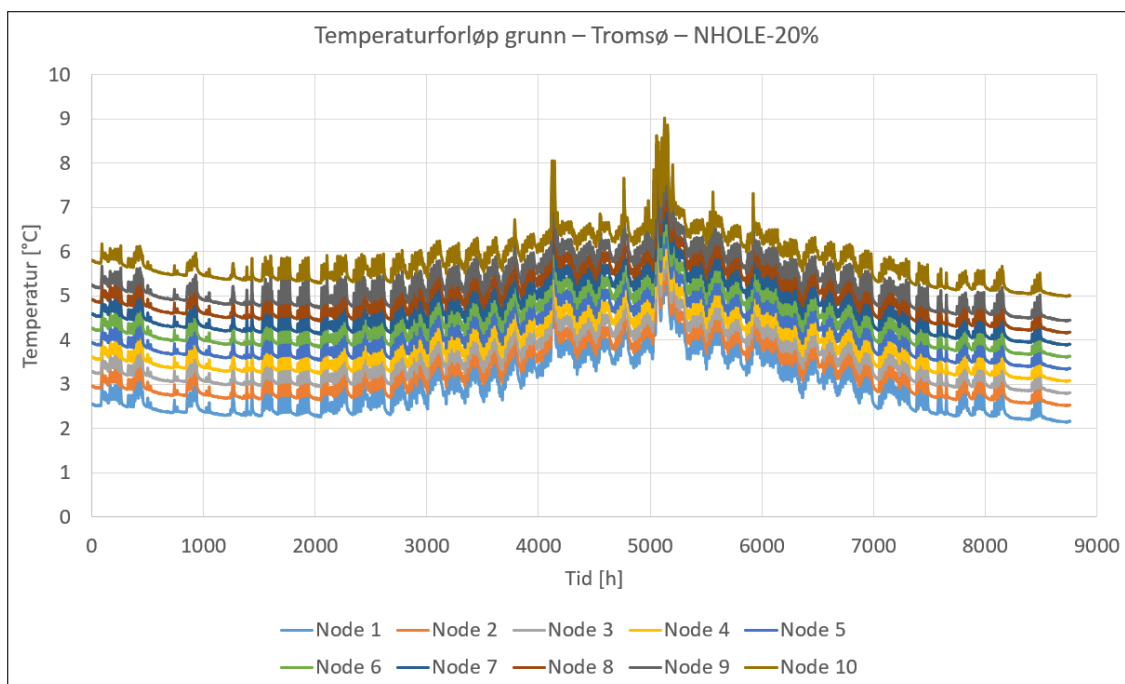
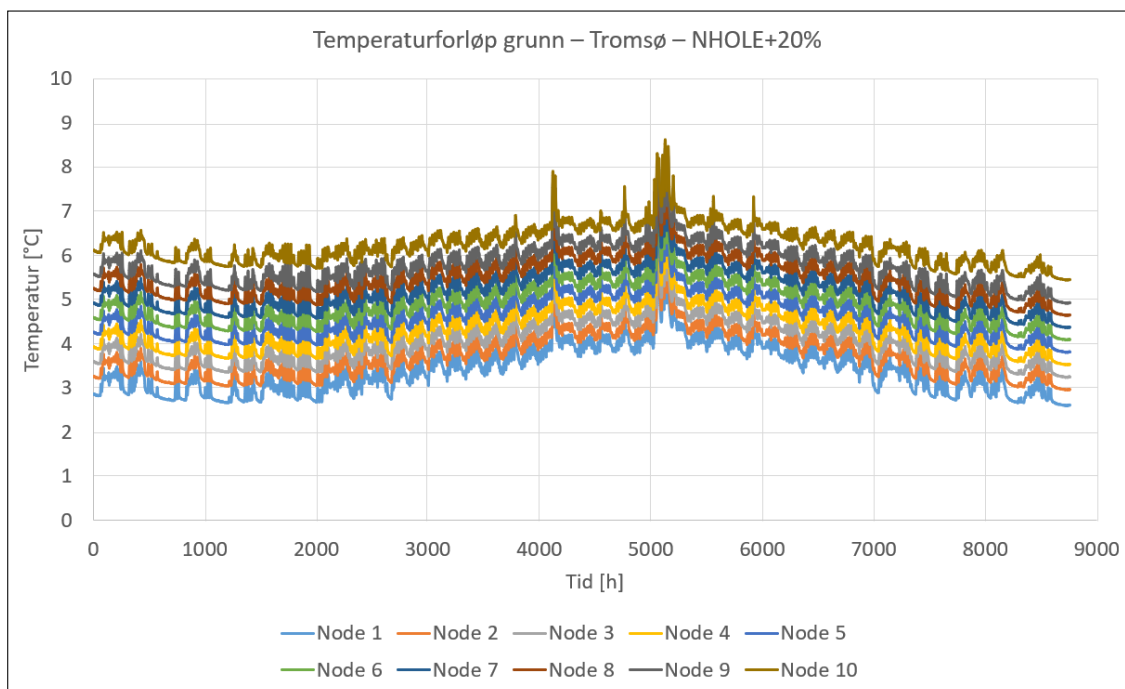


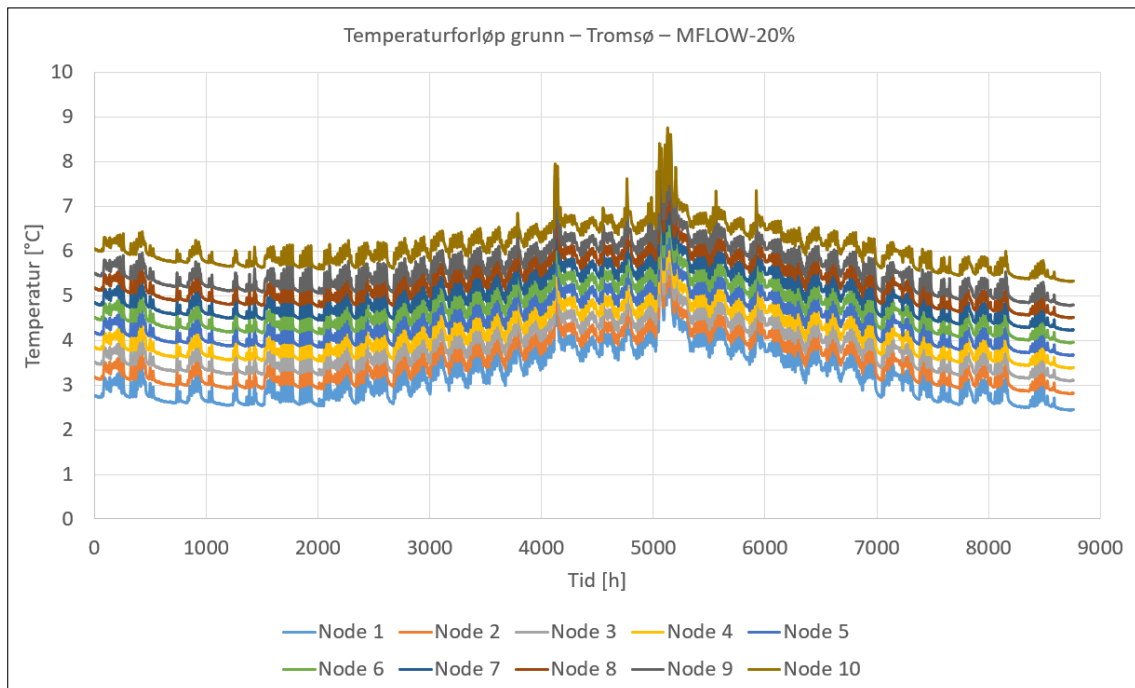
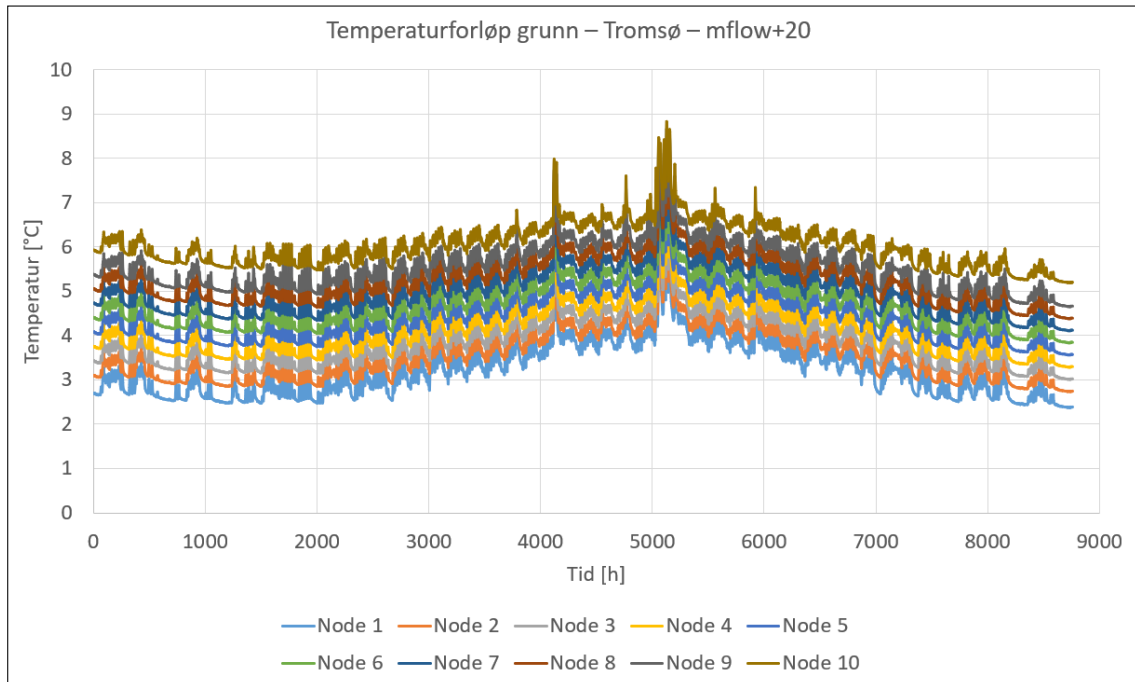




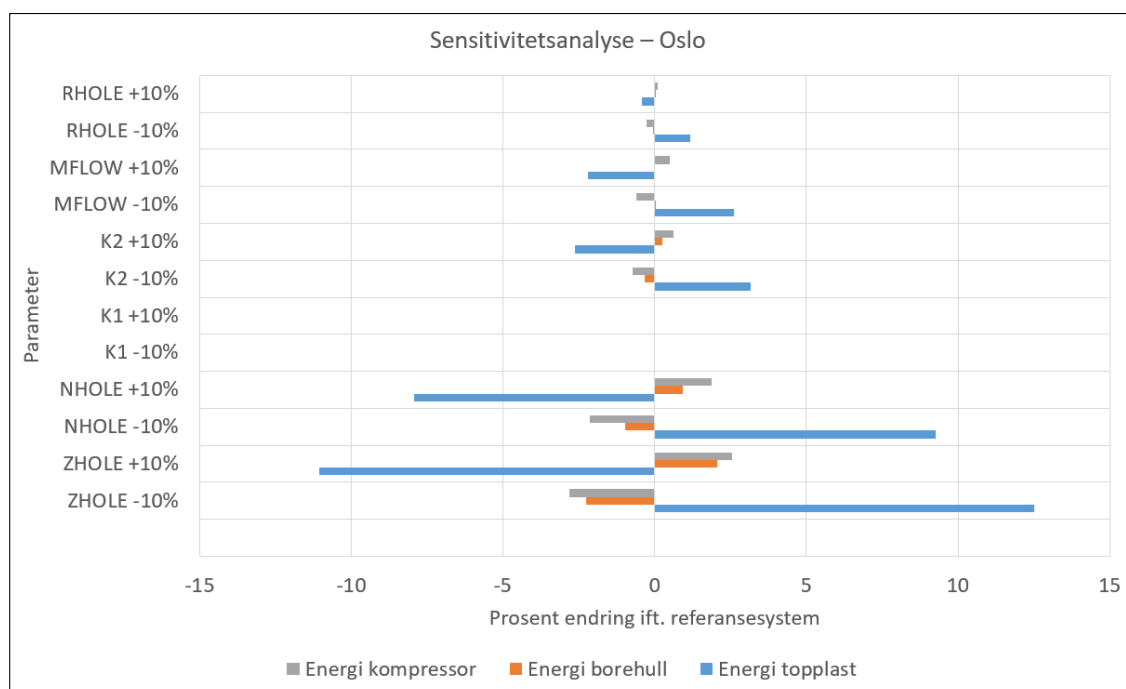




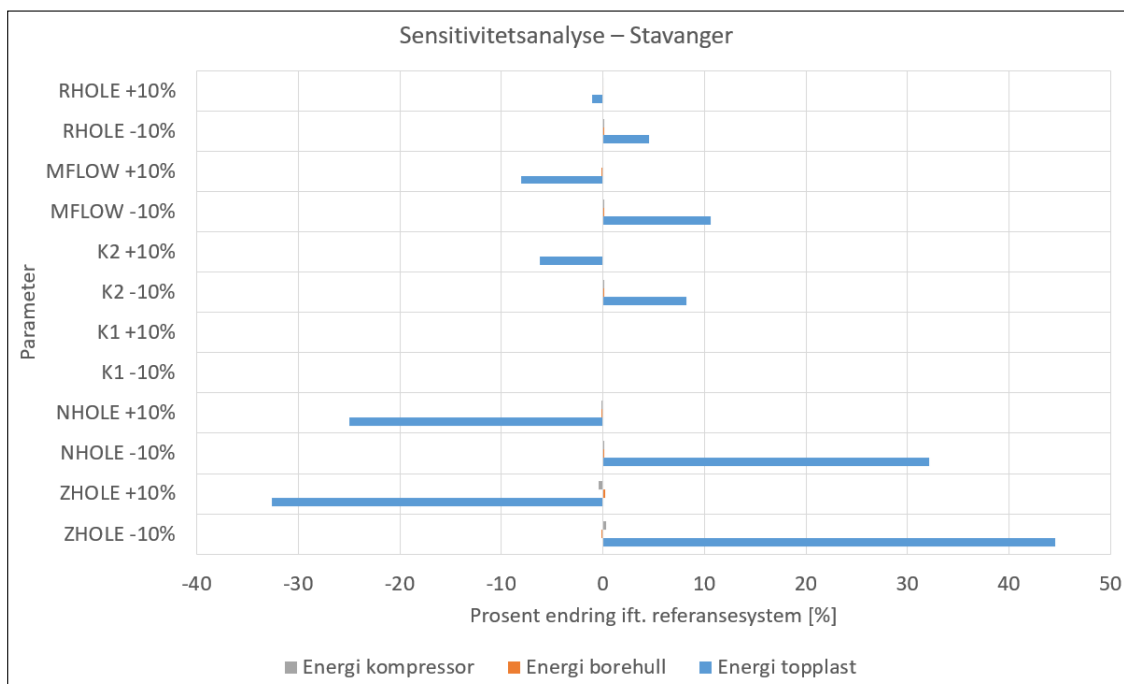




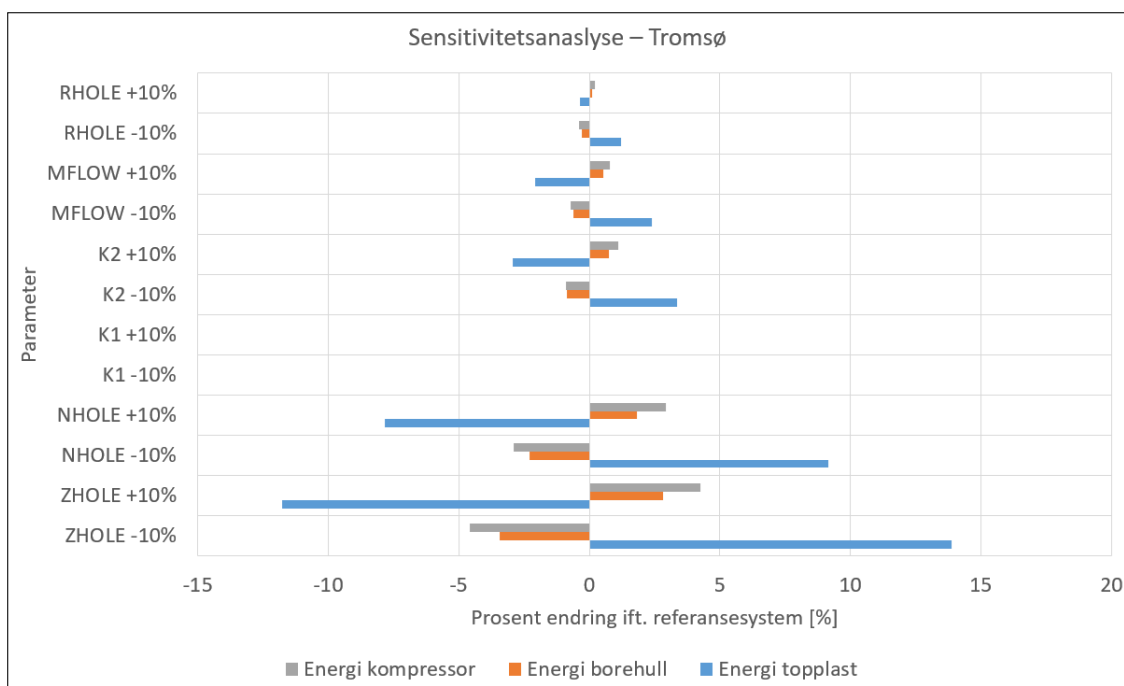
B.3 Sensitivetsanalyse – 10% parameterendring



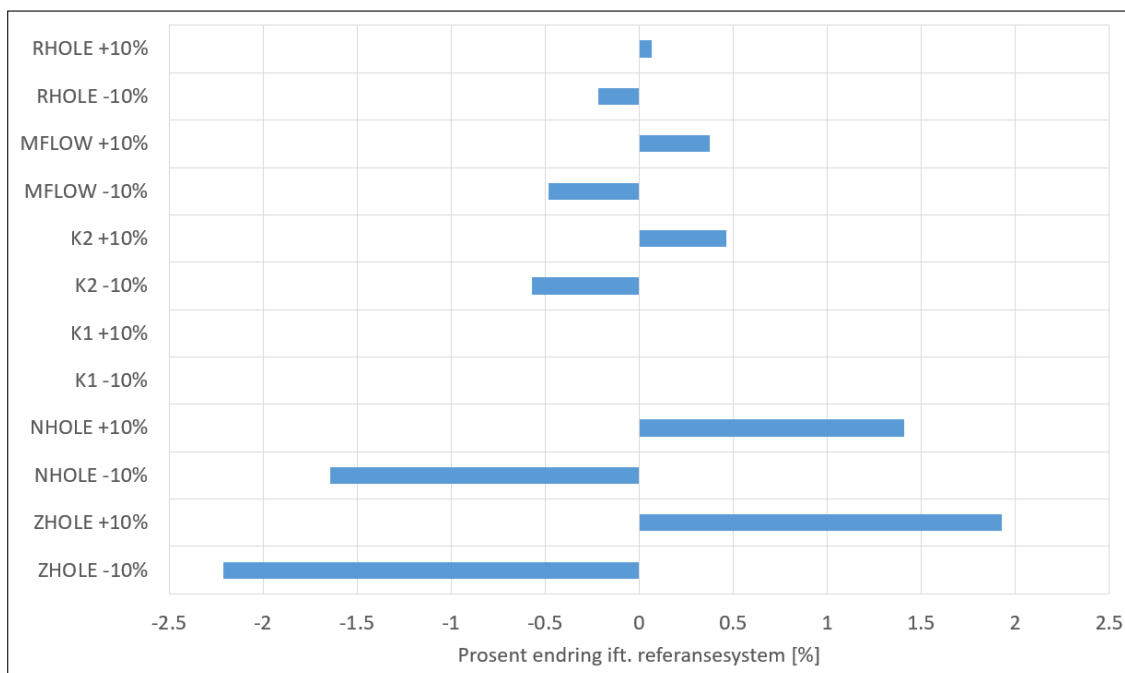
Figur 36: Sensitivetsanalyse for 10% parameterendring, Oslo klima



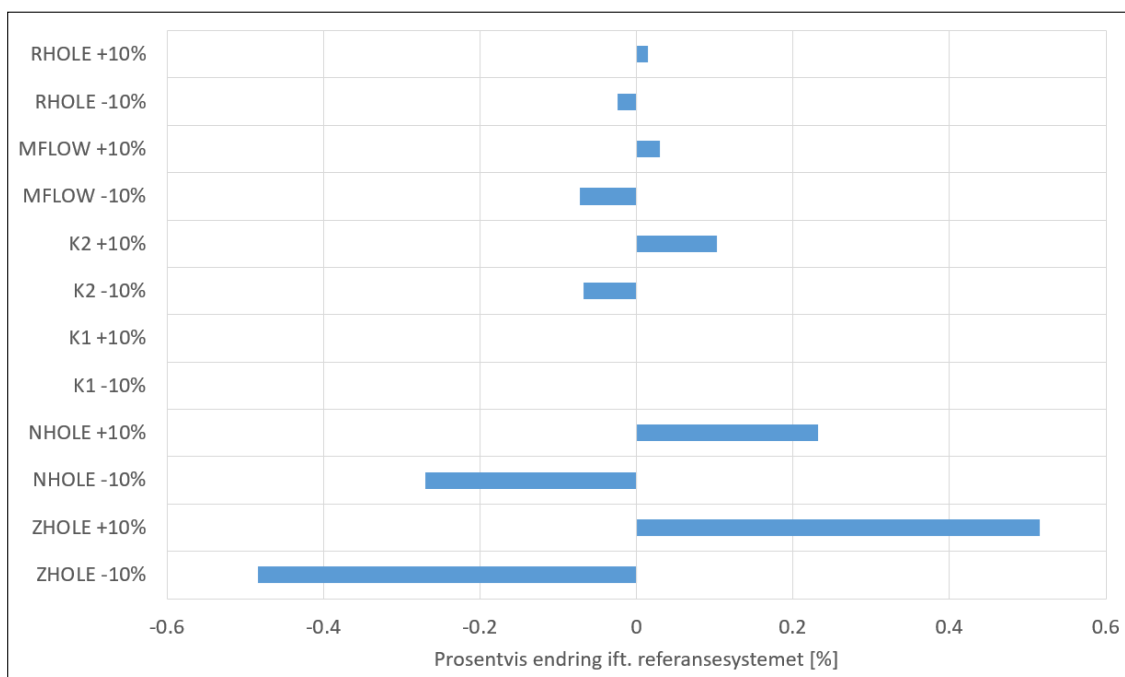
Figur 37: Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, Stavangerklima



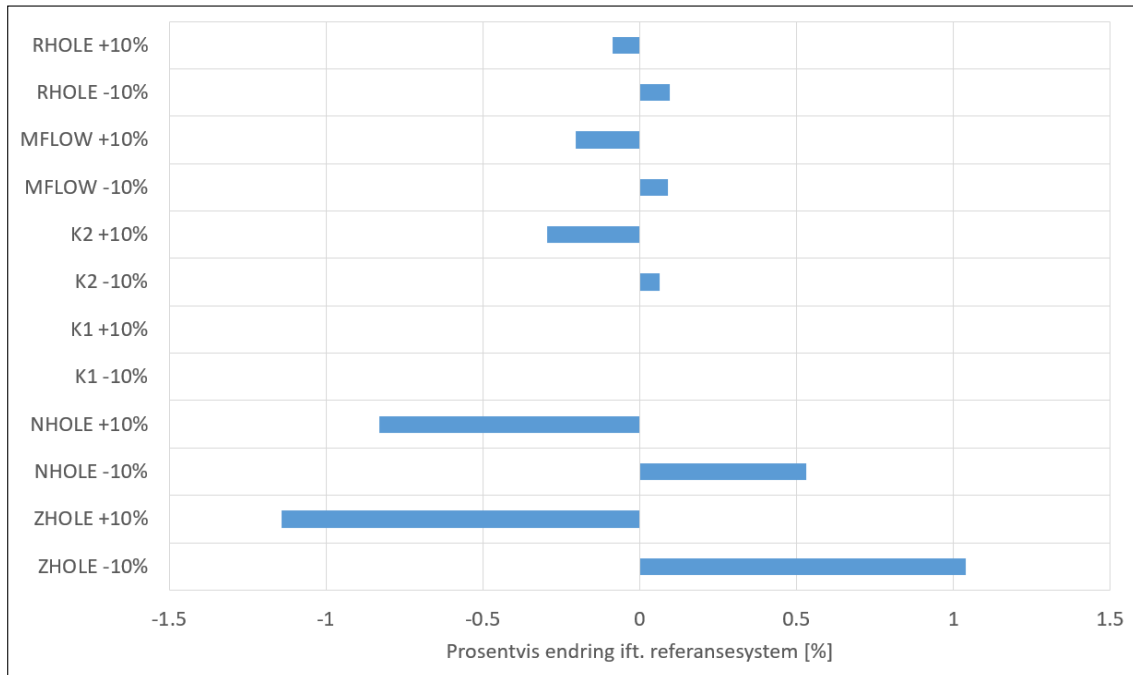
Figur 38: Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, Tromsøklime



Figur 39: Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, COP – Osloklima



Figur 40: Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, COP – Stavangerklima



Figur 41: Sensitivitetsanalyse for 10% parameterendring, COP – Tromsøklima

C Optimiseringsalgoritme

```
Vary{
#FOR par IN [@ input contents]
  $(: call parmrn-parm-to-genopt par)
#END FOR
}

OptimizationSettings
{
    MaxIte = 1500;
    MaxEqualResults = 10;
    WriteStepNumber = true;
    UnitsOfExecution = $(: call simulation-nproc);
}

Algorithm{
    Main = GPSPSOCCHJ;
    NeighborhoodTopology = vonNeumann;
    NeighborhoodSize = 5;
    NumberOfParticle = 10;
    NumberOfGeneration = 10;
    Seed = 50;
    CognitiveAcceleration = 2.8;
    SocialAcceleration = 1.3;
    MaxVelocityGainContinuous = 0.5;
    MaxVelocityDiscrete = 4;
    ConstrictionGain = 0.5;
    MeshSizeDivider = 2;
    InitialMeshSizeExponent = 0;
    MeshSizeExponentIncrement = 1;
    NumberOfStepReduction = 4;
}
```