

FINAL REPORT

Termisk energilagring i berggrunnen med aktivt bidrag fra grunnvann

Zero Village Bergen

Kunde:
RFFVEST

Forfattere:
Kirsti Midttømme, Jan Kocbach, Ingvar Henne, Eivind Bastesen,



Dokumentinfo

Forfatter(e)
Kirsti Midttømme
Jan Kocbach
Ingvar Henne
Eivind Bastesen

Klassifisering
Åpen (A)

Tittel

Termisk energilagring i berggrunnen med aktivt bidrag fra grunnvann

Sammendrag

Denne rapporten er sluttrapport for RFFVEST forprosjektet «Termisk energilagring i berggrunnen med aktivt bidrag fra grunnvann for nullutslippsutbygging». Forstudiet er rettet inn mot Zero Village Bergen, Norges største nullutslippsprosjekt for boliger på Ådland ved Bergen. Rapporten oppsummerer 1) et litteraturstudie om termisk energilagring i krystallinske bergarter med spesiell fokus på effekten av grunnvannsstrømning, 2) uttesting av fiberoptiske temperaturmålinger i to energibrønner i Meland, 3) geologisk kartlegging av ByBo's planlagte utbyggingsområde for Zero Village Bergen og enkle simuleringer for design av en brønnpark for Zero Village Bergen

Prosjektinfo

Kunde
RFFVEST

Kundens ref.

CMR projektnr
311507

CMR prosjektnavn
RFF Zero Village Bergen
Energilagring i grunnen

Revisjon

Rev.	Dato	Forfatter	Kontrollert av	Godkjent av	Årsak til revisjon
00	22.02.2016	Kirsti Midttømme, Jan Kocbach, Ingvar Henne, Eivind Bastesen	Kåre Villanger	Stian Anfinsen	
01	22.08.2016	Kirsti Midttømme Jan Kocbach Ingvar Henne Eivind Bastesen	Kåre Villanger	Stian Anfinsen 	Inkludert siste oppdateringer og justeringer ihht avtale med Bybo

Innhold

Ansvarsavgrensning	4
1 Innledning	5
2 Litteraturstudie geotermisk energilagring	6
2.1 Energilagring i grunnen	6
2.2 Forundersøkelser av lokale grunnforhold	7
2.3 Systemdesign og -analyse	8
2.4 Monitorering av bergvarmeanlegg	9
2.5 Design av brønnparker	10
2.6 Økonomiske modeller og vurderinger og miljøeffekter	10
2.7 Case studies	11
2.7.1 Anlegg i Norge	11
2.7.2 Anlegg i Bergensområdet	11
2.7.3 Prosjekter rettet mot bolighus.....	11
3 Uttesting av fiberoptiske temperaturmålinger	13
3.1 Test lokalitet: Mjåtveitflaten.....	13
3.2 Installasjon av loggeutstyr.....	13
3.3 Logging av temperatur i borehull	16
3.3.1 Temperaturlogg borehull A	16
3.3.2 Temperaturlogg borehull B	16
4 Geologisk kartlegging av ByBo`s planlagte utbyggingsområde	19
4.1 Regional geologi	19
4.2 Geologisk kartlegging av Ådland	20
4.2.1 Bergartstyper	21
4.2.2 Sprekkekartlegging	22
4.2.3 Grunnvannspotensialet.....	24
4.2.4 Varmeledningsmålinger	25
4.3 Effekt av grunnvann Brønndesign basert på de geologiske dataene	27
5 Design av brønnpark for Zero Village Bergen	28
5.1 Inputdata for EED simuleringer.....	28
5.2 Case «Standard»	32
5.3 Case Energilagring.....	33
5.4 Case Grunnvannsbidrag	35
5.5 Case Effektlast	35
5.6 Oppsummering av simuleringer	38
6 Sammendrag og konklusjoner	39
7 Referanser	40
Appendix A Forkortelser	45

Ansvarsavgrensning

CMR er ikke i noen henseende ansvarlig for den aktuelle bruk av dokumenter, programvare eller andre verktøy eller prosjekresultater og påtar seg derved intet ansvar eller garanti for den helhetlige funksjonalitet ved bruk av informasjonen om dette ikke er spesifikt angitt i tilbudsokumentet og den etterfølgende kontrakt.

1 Innledning

Denne rapporten er sluttrapport for RFFVEST forprosjektet «Termisk energilagring i berggrunnen med aktivt bidrag fra grunnvann for nullutslippsutbygging». Forstudiet er rettet inn mot Zero Village Bergen, Norges største nullutslippsprosjekt for boliger på Ådland ved Bergen.

Energilagring vil være en sentral komponent i framtidens energisystem for nullutslippsboliger. Disse energisystemene krever fleksible og energieffektive løsninger. I et geotermisk energilager kan energien utnyttes når det er behov, uavhengig av vær eller når den produseres. Energilager gjør det også mulig å bedre kunne utnytte lokal lavtemperatur-energi fra sol, sjø, berggrunn og grunnvann i tillegg til å utnytte spillvarme fra industri, bygninger og infrastruktur i nærområdet. Ved å utnytte grunnvannet bedre, antas det at termisk energilager i fjell BTES (Borehole Thermal Energy Storage) - system kan optimaliseres og tilpasses bedre framtidige energibruk med mindre oppvarmingsbehov, men med hyppigere variasjoner mellom oppvarming og kjølebehov.

Målet med forstudiet har vært å kunnskapsoppbygging innen geotermisk energilagring slik at man har et tilstrekkelig grunnlag til å gå videre med en større prosjektsøknad. Videre har det vært en målsetning å utføre en innledende geologisk kartleggingsstudie av Ådland og området rundt, med fokus på berggrunn, grunnvann og strukturgeologi, for å ta ut noe av usikkerheten i forhold til grunnforhold i forkant av at et hovedprosjekt og for på den måten kunne lage et mer spisset hovedprosjekt i forhold til hvilke lagringskonsepter som det blir arbeidet med videre. Det også vært et mål å teste bruk av fiberoptiske temperaturmålinger.

Denne rapporten er lagt opp på følgende måte:

- I kapittel 2 er det gjort et litteraturstudie på termisk energilagring i krystallinske bergarter med spesiell fokus på effekten av grunnvannsstrømning.
- I kapittel 3 er det rapportert uttesting av fiberoptiske temperaturmålinger i to energibrønner på Mjøtveitflaten på Meland for å undersøke påvirkningen av grunnvannsstrømning.
- I kapittel 4 er det utført en geologisk kartlegging av ByBos planlagte utbyggingsområde, Ådland, sør for Bergen med hensyn til berggrunnens termiske egenskaper, sprekkesoner og grunnvannsstrømning.
- I kapittel 5 er det gjort en evaluering av et potensielt større energilagingskonsept i det aktuelle testområdet ut fra scenarier for energibehov, energitilgang og de geologiske forundersøkelsene. Dette inkluderer enkle simuleringer med programvaren EED for å anslå kapasitet og design for et større BTES system.

2 Litteraturstudie geotermisk energilagring

I dette kapittelet blir det gjort et litteraturstudie inn mot termisk energilagring i fjell. Det er spesiell fokus på krystallinske bergarter og hvilken effekt grunnvann har på energiuttak og energilagring i berggrunnen. Litteraturstudien omfatter både fulle systemløsninger og spesifikke studier på de sentrale komponentene i systemet. Litteraturstudien inkluderer også en oversikt over en del relevante case studies.

Grunnvarme utvinnes vanligvis med energibrønner, og en samling av flere brønner kalles en brønnpark. Størrelsen varierer fra enkeltbrønner til store brønnparker med 200-250 brønner. Brønnene utføres vanligvis som vertikale borehull, og konstrueres for å være effektive varmevekslere slik at varme/kulde effektivt overføres mellom borehull og omgivelser. Begrepet «reservoar» benyttes typisk for borehullets omgivelser. Reservoaret er ikke nødvendigvis et avgrenset området, men er det berggrunnsvolumet som blir påvirket ved temperaturendringer forårsaket av uttak av varme eller kulde fra grunnen (1).

2.1 Energilagring i grunnen

Egenskapene til et geotermisk energilager er bestemt av den stedege geologien og lufttemperaturen. Berggrunnen i Norge består generelt av tette krystallinske bergarter. De fleste geotermiske energilagrene (anslagsvis mer enn 90 %) i Norge er derfor energilagere i berggrunn (BTES, «Borehole Thermal Energy Storage») med energibrønner, der varme eller kulde fra kollektorslanger overføres mellom borehull og berg i hovedsak ved konduksjon (2) (3). De geotermiske egenskapene til berggrunnen er avgjørende for kapasitet, effekt og energitap for et borehullbasert energilager. I BTES-anlegget til InfraCity i Stockholm ble det dokumentert et gjenbruk på 89 % av varmen som ble injisert i grunnen (4). Generelt vil energitapet være bestemt av temperaturen i energilageret samt design av lageret. Høy temperatur gir større varmetap til omgivelsene, og kompakt lager der brønnene er boret tett er gunstig med hensyn på varmetap

Energilagring i grunnvannsreservoar (ATES, «Aquifer Thermal Energy Storage») er et alternativ til BTES der det er gode grunnvannsakkviferer tilgjengelig (5) (6) (7) (8) (9). I ATES system utnyttes energien i grunnen ved å sirkulere grunnvannet. Disse anleggene kalles også «åpne grunnvarmeanlegg» mens energiuttak ved energibrønner benevnes «lukkede systemer» ATES er billigere og mer effektive energilagere enn BTES, men siden disse systemene er åpne, vil de være mindre driftssikre. Ved Oslo lufthavn (10) har det blitt installert et stort anlegg hvor termisk energi er lagret i store grunnvannsakkviferer i breelvavsetninger. Et tilsvarende anlegg finnes ved Stockholm lufthavn (11). Gode potensielle grunnvannsakkviferer i Norge er typisk sand og grusavsetninger avsatt ved siste istid breelvavsetninger, disse finnes typisk innerst i dalstrøkene på østlandet og innerst i fjordene på vestlandet. Av den grunn er det begrensede med slike grunnvannsakkviferer på vestlandet spesielt med tanke på områder med mye bosetning på Vestlandet. På Voss har NGU og NVE kartlagt potensialet for geotermisk utnyttelse av grunnvannsforekomsten i Voss sentrum i 1999 (12). Luster ungdomsskule utnytter også grunnvannet fra grove sedimentære avsetninger (13). Et annet type ATES er direkte bruk av grunnvann fra fjellbrønner i fast fjell. De fleste bergartene i Norge har lav permeabilitet da de stort sett består av krystalline metamorfe og magmatiske bergarter. Det kan derfor ikke forventes store grunnvannsuttak fra fjellbrønner. Et unntak er rombeporfyr, en bergart som finnes på i store deler av Osloområdet og er en del av Oslofeltets unike geologi. Rombeporfyr finnes som størknede lavalag som danner store nærmest terrasselignende flater i f.eks Krokskogen nordvest for Oslo. De finnes også som ganger som kutter gjennom steinlagene. Det er imellom og i disse rombeporfyrgangene at det er betydelig fokusert grunnvannsstrømning, dette skyldes hovedsakelig en økt grad av oppsprekking.. Grunnvarmeanlegg i Vestfold (eks Sandetun og Tønsberg sykehus) pumper opp grunnvann fra rombeporfyr og utnytter det til oppvarming og kjøling. Det finnes også ATES anlegg i Norge som utnytter grunnvann fra grunnvannsførende sprekker. Eksempel på slike anlegg er Multiconsult bygget på Nesttun, Bergen, Kunnskapsparken i Drammen, Drengerudbekken, Asker; CIENS bygget i Forskningsparken på Blindern, Oslo, Kvikne skole, Kvikne. Utfordringen med dette alternativet er å forutsi potensialet for større grunnvannsuttak. Bortsett fra anlegget ved Drengerudbekken var disse anleggene designet som BTES systemer, men justert til ATES system da det ble påvist betydelig grunnvannsuttak.

I dette prosjektet vil det være fokus på bruk av energibrønner i fjell, med målsetning om å optimalisere anlegget ut fra berggrunnsegenskaper og grunnvannspotensialet.

Tilstedeværelsen av grunnvann vil ha stor betydning for effekten og lagringskapasiteten for BTES-systemer (14). Grunnvannstrøm i tette grunnfjellsbergarter er stort sett knyttet til sprekker og svakhetssoner. Luft isolerer, og kun delen av energibrønner under grunnvannsnivå antas som effektiv og benyttes i varmeveksling av varme og kulde med fjellet. Naturlig grunnvannstrøm i sprekkesoner er forårsaket av tyngdekraft og/eller hydrauliske trykk- (topografi) eller temperaturforskjeller, og kan føre til endring i temperaturnivået og lagringspotensialet i BTES-systemer. Grunnvann kan både transportere vekk magasinert varme og tilføre varme til en energibrønn (14). Forståelse av samspillet mellom grunnvannstrøm, bergartens sprekkesystem, varmekapasitet og varmeledning er derfor fundamental for å utvikle en mer optimalisert design (brønnplassering) og mer effektiv utnyttelse og drift av et BTES-system.

Det er gjort flere arbeid på modellering av effekten av grunnvannsbidraget på BTES, se blant annet (15), (16). Et interessant arbeid på dette området er arbeidet til Zanchini med flere (17) som ser på effekten av grunnvannsstrømning i forhold til energiuttak fra et GHP-anlegg over lang tid med ubalansert energibehov på vinter- og sommertid ved hjelp av simulering-programvaren COMSOL Multiphysics. I en simulering over en periode på ett år ble det vist at grunnvannsstrømningen ikke reduserer peak load på timesbasis, men økt grunnvanns-strømning gir forbedret langtidsytelse for systemet. Relaterede studier er også utført i (18) og (19). Hecht-Méndez med flere presenterer prosedyrer for mer optimal regulering av varmeveksling i energibrønne i områder med grunnvannsstrømning. Dette arbeidet ser på hvordan man kan ta med den positive effekten av grunnvannsstrømning i en optimaliseringsmodell for design og drift av store grunnvarmeanlegg. Det blir blant annet konkludert med at man med grunnvannsstrømning kan ha økt temperatur på vannet som tas ut. (19) konkluderer med at minimum avstand mellom borehull er vesentlig mindre på tvers av strømningsretningen for grunnvann enn langs strømningsretningen. I områder med grunnvannstrømning er derfor en generell minimumsavstand lite hensiktsmessig, og det bør tas hensyn til retning og størrelse på grunnvannstrømning ved plassering av borehull i en brønnpark slik at borehullene ligger tettere på tvers enn langs strømningsretningen.

2.2 Forundersøkelser av lokale grunnforhold

Geologien er unik, og ingen energilagrer er like. Desto viktigere er det å ha god forståelse om bidraget fra de forskjellige varmemekanismene i grunnen med hensyn på optimalisering av framtidige systemer (20) (21). Ved etablering av et større grunnvarmeanlegg er det derfor viktig å innhente informasjon om de lokale grunnforhold. Viktige parametere er berggrunnens varmeledningsevne, sprekke-systemet i fjellet og grunnvannsstrømning. Med god kjennskap til grunnforholdene kan man optimalisere brønnparken med hensyn på antall brønner, boredyp og brønnavstand (22).

For å estimere varmeledningsevnen i grunnen er utgangspunktet at man benytter den informasjonen som er tilgjengelig om lokal geologi via tilgjengelige kilder sammen med erfaringer fra andre boringer og grunnvarmeanlegg i nærheten. En viktig parameter i forhold til grunnvannsstrømning er å opparbeide seg kjennskap til sprekkesystemet i fjellet i områder grunnvarmeanlegget skal etableres.

Geir Morland gjorde et omfattende studie om grunnvann i fjellbrønner i Norge i 1997 der han gjorde omfattende statistiske analyser basert på alle innrapporterte grunnvannsbrønner (23).

Informasjon om grunnvannskvalitet er også viktig. Spesielt ved ATES kan høyt innhold av jern, mangan og kalsium i grunnvannet medføre driftsproblem, i form av korrosjon og sementering. Grunnvannskjemien kan også gi indikasjoner på bergarter og sprekkesystemer oppstrøms fjellbrønner. I referanse (24) er det publisert et spesifikt studie om grunnvannskvalitet i fjellbrønner fra området nær Bergen. Informasjon om grunnvannstrømning i fjellbrønnene i nærområdet til Zero Village Bergen innrapportert i NGUs grunnvannsdatabase, GRANADA er presentert i kapittel 4.

Varmeledningsevnen kan beregnes ut fra målinger i lab på bergartsprøver (25). Det er i dette forprosjektet gjort et arbeid på å bestemme varmeledningsevnen i grunnen samt å få kjennskap til geologien i området. Dette arbeidet er dokumentert og presentert i kapittel 4.

Effektiv varmeledningsevne i en energibrønn kan også beregnes ut fra en termisk respons test. (26), (27) – også kalt TRT. Se (22) for en historisk oversikt over utviklingen til TRT og (28) for en oversiktsartikkel på state-of-the-art innen TRT. Det utføres ofte en TRT måling i en testbrønn for å designe større BTES anlegg. I Norge finnes det nå minst 5 TRT rigger. En standard TRT utføres ved at man borer en prøvebrønn og deretter tilfører varme ved konstant effekt mens man måler gjennomsnittlig temperatur i borehullet. Ut fra en standard TRT får man estimert en effektiv varmeledningsevne og en effektiv termisk motstand for borehullet. Disse estimerte verdiene vil kunne avvike betydelig fra de reelle verdiene, siden fjellet sjelden er homogent, varmeledningsevnen typisk varierer både med dybde og posisjon, og andre parametere som f.eks. grunnvannsstrømning påvirker målingene (22). Grunnvannsstrømning er spesielt problematisk siden sterk grunnvannsstrømning nærmest kan «kortslette» TRT målingen (29). Det er utviklet ulike metodikker for å forbedre en TRT-test for å få ut mer informasjon om de lokale grunnforholdene. En utvidet metode for TRT er å benytte ulike sensorer nede i brønnen for å foreta målinger av temperatur eller andre parametere mens man foretar den termiske respons testen; enten kablete eller trådløse sensorer nedsenket i brønnen (30), (31), (32) eller fiberoptiske målinger til å foreta distribuerte temperaturmålinger nede i brønnen (33), (34). Det er også gjort betydelig arbeid inn mot TRT for brønner med grunnvannsstrømning (35), (36), (37), (38), (39). Wagner med flere (38) har i tre testområder med grunnvannsstrømning evaluert en metode for korreksjon av beregninger basert på TRT og ren konduktiv varmetransport. Metoden utvider bruksområdet for TRT til områder med Darcy-bevegelser utover 0.1 m/dag.

2.3 Systemdesign og -analyse

Geotermisk energi inngår ofte som en viktig komponent i energisystemet for en gitt bygningsmasse (40). I tillegg til den geotermiske energien vil energisystemet typisk få tilført energi fra andre energikilder, som f.eks. solfangere som tilfører solenergi. Tilgangen til energi fra ulike energikilder og behovet for oppvarming/kjøling vil variere med tid både på lang tidsskala (mer solenergi tilgjengelig på sommeren enn på vinteren; høyere behov for oppvarming på vinteren) og på kortere tidsskala (solenergi kun tilgjengelig på dagtid; ofte høyere behov for oppvarming på kveldstid i boliger). Generelt for boliger - er at behovet for energi og tilgangen på energi i motfase, og det er derfor behov for å lagre energien når denne er tilgjengelig for så å hente den opp igjen når behovet er tilstede (41). Energilagring i berggrunnen er en effektiv metode for sesonglagring av energi. Energi kan da lagres i berggrunnen i sommerhalvåret og hentes opp igjen i vinterhalvåret, og utnyttes ved bruk av varmepumper. Energilagring i berggrunnen vil øke effektiviteten av et varmepumpeanlegg ved at temperaturen i berggrunnen er høyere, og dermed begrenses også bruken av elektrisitet til drift av varmepumpene (42), (43). Videre kan antallet borehull reduseres betydelig ved at borehullene lades opp med tilført varme istedenfor å kun varmes opp fra omgivelsene.

For å utnytte geotermisk energilagring på en mest mulig effektiv måte, er det hensiktsmessig å analysere hele eller større deler av energisystemet samlet i et langtids-perspektiv (typisk 15-20 år). Avhengig av kompleksiteten på systemet kan en slik analyse enten gjøres ved hjelp av enkle betraktninger ut fra erfaringsdata, eller ved å modellere hele eller deler av energisystemet i en system-modell. EED (Earth Energy Designer) er et spesialverktøy for systemsimuleringer på brønnparknivå som vil bli brukt i dette arbeidet (44). EED er benyttet i en lang rekke publiserte arbeider siden det ble utviklet midt på 90-tallet. En sammenligning av EED med andre tilgjengelige verktøy er gitt i (45). I EED kan størrelse, antall brønner og layout for en brønnpark optimaliseres i et langtidsperspektiv ut fra informasjon om en rekke parametere, bl.a. termisk last fra bygninger, tilført varme via andre kilder, lokal geologi. Det finnes også flere ulike simuleringsverktøy for simuleringer av komplette energisystemer inklusiv bygningsmasse der geotermisk energilagring inngår som en viktig komponent, som bl.a. TRNSYS (46) og IDA ICE (47). En oversikt over modellering av energisystem med energibrønner er gitt i (48).

En tilgjengelig metode for oppladning av borehull i berggrunnen i sommersesongen som er mye brukt er bruk av solfangere (49) (50) (51) (52) (53). Doktorgradsarbeidet til Kjellson fra 2009 (53) er et sentralt arbeid i forhold til kombinasjon av solfangere og grunnvarmeanlegg for oppvarming av boliger. I (53) benyttes systemsimuleringsverktøyet TRNSYS til å se på hvordan behovet for elektrisitet kan reduseres ved å introdusere solfangere for å lade opp grunnvarmeanlegg i løpet av sommersesongen. På grunn av lading av borehullene med solfangere på sommeren, har vannet som blir pumpet opp fra berggrunnen vinterstid høyere temperatur, noe som gjør at det kreves mindre elektrisk energi for varme opp vannet til en gitt temperatur ved hjelp av varmepumper. I tillegg er peak load kapasiteten til anlegget

større. Men (53) peker samtidig på viktigheten av å se på helheten av systemet ved at det må benyttes elektrisk energi for å drive sirkulasjonspumpene på sommeren for lading av borehullene. For nye, effektive sirkulasjonspumper er behovet for elektrisitet lavere og systemregnskapet viser at man kan akseptere å lade mer. (53) peker også på at det ideelle systemet er et system der solfangere blir benyttet direkte til oppvarming av varmtvann på sommeren mens de på vintertid benyttes til lading av borehull; Optimale driftsbetingelser vil avhenge av klimaet. I (54) er det gitt en oversikt over klimadata; slike data er viktige både i forhold til behov for oppvarming/kjøling og i forhold til tilgang på solenergi for solfangerne.

En problemstilling som er aktuell i forbindelse med bruk av solfangere er at tilgjengelig areal for solfangere er for lite. I slike tilfeller kan det være aktuelt å benytte kombinerte enheter som er solcelle og solfanger i ett (55). En case studie på dette på Varden skole i Bergensområdet blir beskrevet i større detalj i seksjon 2.7.3 nedenfor. Alternativt til bruk av solvarme er spillvarme fra industribygg en svært god energikilde for lading av borehull (56) dersom industribygg med spillvarme er tilgjengelig i nærområdet. Det er også mulig å benytte sjøvann og vann fra elv sommerstid til opplading.

De tradisjonelle BTES-systemene har relativt lang responstid. Det har derfor vært utfordringer ved å håndtere store effektlaste og/eller raske vekslinger mellom kjøling og oppvarming, noe som har satt begrensninger på å bruke BTES som døgn-/korttidslagere. Ved tilpasninger og optimaliseringer i design og drift av slike systemer er det mulig å gjøre responstiden kortere. Et eksempel på slik optimalisering er utvikling av mer effektive kollektorløsninger (57). For å ta raske variasjoner i energibehov er det utviklet alternative dynamiske løsninger for termisk energilagring, f.eks. ved hjelp av PCM («Phase Change Materials») (58). Energilagring basert på PCM er også aktuelt for utnyttelse av spillvarme fra industri, og modeller for simulering av livssyklus for industrianlegg viser både kostnadsbesparelser og miljøgevinster (59). Det er gjort en rekke ulike studier på dynamisk energilagring, f.eks. (60) som ser på energisparende dynamisk termisk lagring, (61) som ser på PCM for sesonglagring av termisk varme for boliger i kaldt klima, (62) som ser på bruk av boligers masse for lagring av termisk energi, og (63) som ser på et mikrogrid for energilagring i leilighetskompleks.

Et viktig element i systemdesignet av et geotermisk anlegg er temperaturbetingelsene man velger i berggrunnen. Høyere temperatur i berggrunnen gjør at man kan begrense bruken av elektrisitet til drift av varmepumpene, evt. også utnytte varmen fra berggrunnen direkte uten varmepumpe (56) (4). Men dette krever at man lader opp reservoaret med relativt høy temperatur, og varmetap blir også større på grunn av større forskjell i temperatur mellom reservoaret og omliggende berggrunn. Et eksempel på et slikt anlegg er Emmaboda i Sverige der spillvarme fra industri blir lagret i berggrunnen på 70 °C (56). Et annet eksempel er Anneberg-anlegget i Sverige der varme fra solfangere blir lagret på 30-45 °C (4). Slike løsninger krever at det brukes flere sesonger på å varme opp reservoaret til ønsket temperatur.

Lavenergihus har andre varme- og kjølebehov enn annen bygningsmasse. I arbeidet (64) er det gitt metodikk for hvordan grunnvarmeanlegg bør skaleres for lavenergihus. Et annet arbeid som ser på bruk av grunnvarme i lavenergihus er (65). I Arendal bygges Norges første nullhusboligfelt Skarpnes ut med 40 boliger der energibrønner er en del av energiløsningen (66). Skarpnes-anlegget blir beskrevet i større detalj i seksjon 2.7.3 nedenfor der ulike case studies blir beskrevet i mer detalj.

2.4 Monitorering av bergvarmeanlegg

I et bergvarmeanlegg vil temperaturen i berggrunnen variere ettersom energi tilføres gjennom kollektoren (lagring av varme eller kjøling, avhengig av bruksmønster) og hentes ut gjennom kollektoren (uttak av varme eller kjøling). I tillegg vil varmestrømning fra/til omliggende fjell gjennom konveksjon og tilført varme/kjøling fra grunnvanns-strømning påvirke temperaturen i berggrunnen (35).

For å forstå bergvarmeanlegg i driftsfasen er det viktig å ha kunnskap om hvordan temperaturen i berggrunnen varierer som funksjon av tiden. Dette gjelder både forskjell i temperatur mellom ulike borehull i en brønnpark og som funksjon av dybde for det enkelte borehull. Det finnes flere ulike metoder for overvåking av temperaturendringer i geotermiske systemer (67). De fleste brønnparker har temperaturmåling i samlerør før varmepumpen fra en gruppe brønner, typisk er 4-10 brønner ført sammen i en samlelum og temperaturen måles i samlerøret. 'Kun et fåtall anlegg har separate temperaturmålinger for hver enkelt brønn.

Den typen målinger som gir mest informasjon om temperaturen i berggrunnen er bruk av fiberoptiske DTS (Distributed Temperature Sensing) målinger, se (68), (69), (70), (71), (72). I DTS-målinger benyttes en optisk fibersensor til å måle temperaturen i hele borehullet simultant med en oppløsning på godt under en meter. Det betyr at man kan få kontinuerlige målinger av temperaturen i borehullet i driftsfasen, og på den måten kan forstå f.eks. effekten av grunnvanns-strømning og lokale grunnforhold på en helt annen måte enn ved bare å måle temperatur på uttaket. I kapittel 3 blir fiberoptiske temperaturmålinger benyttet for å undersøke to energibrønner på Meland.

2.5 Design av brønnparker

En rekke designparametre vil påvirke kapasiteten for lagring og uttak av energi for en brønnpark, f.eks. dybde på brønner, avstand mellom brønner og layout på brønnparken (73). Lokal geologi, tilgjengelig areal og grunnvannsstrømning i deler/hele brønnparkene er parametre som påvirker optimale valg av designparametrene. I (73) blir det utviklet en optimaliseringsmodell som finner optimalt antall borehull, layout på borehullspark og last for hvert enkelt borehull basert på et gitt oppvarmings- og kjølebehov. Det blir blant annet vist at optimal drift av et grunnvarmeanlegg til dels kan kompensere for manglende lading av anlegget. Det er også gjort en rekke andre arbeider inn mot optimalisering av layout på brønnparker og samspill mellom flere borehull i en brønnpark for ulike typer tilfeller (74), (75), (76), (77), (78).

Det er også gjort flere studier der grunnvannsstrømning er inkludert i studiene (19), (15), (79). Et interessant arbeid er arbeidet til Hecht-Méndez med flere (18) som introduserer en optimaliseringsmodell som inkluderer grunnvannsstrømning for design av brønnparker. Grunnvannsstrømningen kompliserer optimaliseringsalgoritmen på grunn av en ekstra energikilde, men til gjengjeld finner man forbedret effektivitet på varmepumpen. (19) har utviklet en numerisk modell der det er mulig å studere optimal avstand mellom borehull for tilfellet med grunnvanns-strømning. (15) presenterer en hybrid Finite Element basert modell for modellering av borehull med grunnvanns-strømning. Her blir selve energibrønneren modellert med en 1D Finite Element modell mens området rundt blir modellert med en 3D Finite Element modell. På den måten får man en modell som gir betydelig redusert simuleringstid i forhold til en full 3D modell – samtidig blir nøyaktigheten tilstrekkelig god til at modellen kan benyttes til optimaliserings-formål.

Det er også publisert flere studier som har sett på effekten av å benytte borehull som er dypere enn 200 meter (80). Dypere borehull gir lavere energitap ved energilagring fordi berggrunnen er varmere og det derfor blir mindre varmetap. I (80) ble det funnet at med dagens pris på boreteknologi er det kun hensiktsmessig med dypere brønner dersom det er lite plass på tomten der boreparken skal installeres eller dersom det er utfordringer i forhold til grunnforholdene. Lønnsomheten i dette vil avhenge av om borepriser per meter for dypere borehull reduseres.

2.6 Økonomiske modeller og vurderinger og miljøeffekter

Det er store kostnad ved utbygging av store brønnparker. Etablering av brønnparker kan også ha miljømessige konsekvenser. Det er gjort flere arbeider inn mot strategier for innføring av geotermisk energi i stor skala for boliger (81) og inn mot strategier og økonomisk analyse for energilagring (82). Det er også gjort en del arbeider inn mot de miljømessige effektene av grunne systemer (83), (84). Dette er ikke et tema for dette forprosjektet, men kan være et aktuelt element i et hovedprosjekt.

2.7 Case studies

2.7.1 Anlegg i Norge

Det er bygget flere store varmepumpebaserte energisystemer både på Vestlandet og ellers i Norge for å lagre varme og kulde i grunnen for bruk til framtidig oppvarming eller kjøling. De fleste større anlegg er bygget i tilknytning til næringseiendom; en oversikt over større anlegg i Norge blir vedlikeholdt av NGU (85). Totalt er det 26.000 grunnvarmeanlegg i Norge, inkludert noen av de største BTES-systemene i Europa (86), (87).

Blant de største anleggene i Norge er anlegget på Akershus Universitetssykehus med 228 brønner på ca. 200 meters dybde med 8 MW installert kapasitet som ble ferdigstilt i 2007, anlegget ved Nydalen forretningspark med 180 brønner på ca. 200 meters dybde med 6 MW installert kapasitet som ble ferdigstilt i 2004, og anlegget ved Ullevål stadion med 120 brønner på ca. 150 meters dybde med 4 MW installert kapasitet som ble ferdigstilt i 2009 (88), (89).

2.7.2 Anlegg i Bergensområdet

Det er bygget flere hundre grunnvarmeanlegg i Bergensområdet (85) der Sartor senter (90), Høgskolen i Bergen (91) (92), Åsane Storsenter (internrapport NGI) og Haukeland sykehus (personlig kommunikasjon, Jørn Stene, Cowi) er eksempler på større anlegg .

I parkeringsanlegget Kystgarasjen under Sartor senter er det installert 162 brønner på 200 meters dybde som gir 5.6 MW installert kapasitet (90). Estimert årlig energisparing ved full utbygging er estimert til 3.03 GWh der 2.42 GWh er knyttet til varme og 0.61 GWh er knyttet til kjøling. På Sartor senter ble det vurdert om man skulle benytte en løsning mot sjø istedenfor, men en avstand på 80 meter til sjø gjorde denne løsningen for dyr. Anlegget på Sartor senter leverer varme/kjøling til en kombinasjon av næringseiendom og boliger, men dominert av næringseiendom. Anlegget er dimensjonert ut i fra kjølebehovet. Det er lagt opp til en mulig fremtidig varmeleveranse til bygg i nærmeste reguleringsområde.

Ved Høgskolen i Bergen er det installert 81 brønner, hver på 220 meter (43). I tillegg er det installert 4 kuldelagringsstanker med PCM-materiale på til sammen 250 m³ for å ta de raske variasjonene. Fjernvarme fra BKK sitt forbrenningsanlegg i Rådalen er installert for å dekke toppplast/reservelast. I tillegg benyttes indirekte adiabatisk forkjøling på ventilasjonsanlegget for å senke energibehovet ytterligere. Det er kjølebehovet som dimensjonerer anlegget. Anlegget har også mulighet til frikjølingssystem, da kan anlegget veksle direkte mot brønnparken og trenger ikke kjølemaskinene.

Ved Varden skole i Fyllingsdalen, bygges Norges første kombinerte solcelle/solfanger-anlegg. Anlegget kombineres med en liten brønnpark (55). Solceller fungerer best ved lav temperatur. Ved å kombinere solceller og solfangere flyttes den termiske energien vekk fra solcellene når temperaturen blir høy, og benyttes sammen med varme fra energibrønnen i den tilhørende brønnparken for å øke effektiviteten til varmepumpene, eller til lading av energilageret i brønnparken, avhengig av variasjonen i varmebehovet. På den måten kommer overskuddsvarmen på solcellene til nytte et annet sted. Selv om anlegget er unikt i norsk sammenheng, finnes slike andre steder, bl.a. i Sverige (se over).

2.7.3 Prosjekter rettet mot bolighus

Selv om de fleste største geotermiske anlegg betjener næringsbygg, er det også konstruert en del større anlegg som betjener boliger.

Det første eksempelet på kombinert solfanger og bergvarmeanlegg var ifølge (93) boligområdet Anneberg i Danderyd i Sverige der det i 2000-2001 ble installert et anlegg for oppvarming som består

av 100 borehull á 65 meters dybde sammen med 2400 m² solfangere (4). Det ble valgt en høytemperaturs lagringsløsning der temperaturen i energilageret i berggrunnen skulle være på 30-45°C og oppvarming av husene gjøres uten varmpumpe ved å sirkulere vann på ca. 32 °C. Ved såpass høy temperatur i brønnparken ble energitapet estimert til 40% i (4), og det ble ut fra simuleringer konkludert med at systemet måtte være i drift i 3-4 år før temperaturen var høy nok til at det ga den ønsket effekt. I (4) blir det konkludert med at jo større systemet er, jo lavere blir varmetapet fra energilageret og dermed blir også årlig kostnad for oppvarming lavere. Estimater for et 3 ganger så stort anlegg viste innsparinger på 20 %. Praktiske erfaringer fra Anneberg rapportert i (93) viste at anlegget ikke klarte å levere like mye varme som forutsatt.

I Arendal bygges Norges første nullhus-boligfelt Skarpnes ut med 40 boliger der energibrønner er en del av energiløsningen (66). Det var opprinnelig planlagt å benytte kombinasjon av energibrønn og solfangere, men etter en total-vurdering ble solfangere valgt bort og det ble istedenfor valgt å benytte det tilgjengelige arealet til flere solceller på taket. En kombinasjon av plassmangel, økt kostnad for legging av grøft og ledninger samt at solceller synker i pris og blir mer effektive var årsaken til dette valget. I prosjektet ble det også vurdert om man skulle satse på en felles brønnpark eller enkeltbrønner per hus; valget falt på én brønn per bolig med dybde på ca. 100 meter; dette valget ble gjort for å slippe å ha et stort, komplekst røranlegg. Ut fra en artikkel i Teknisk Ukeblad (94) er det noe uenighet om det er hensiktsmessig å kutte ut solfangeren eller ikke ut fra et totalt systemperspektiv.

3 Uttesting av fiberoptiske temperaturmålinger

3.1 Test lokalitet: Mjåtveitflaten

CMR har i samarbeid med Vestnorsk Brunnboring AS valgt to nye energibrønner ved en industripark på Meland (Mjåtveitflaten, Meland) for installasjon av fiberkabel for temperaturmåling. Brønnene ble boret i november 2015 ved et nytt bygg i en industripark på Meland. Se Figur 1 for geografisk posisjon til borehullene.

Fordelen med å velge nye energibrønner for dette formålet er at fiberkabel kan monteres på kollektorene ved installasjon av disse, og føres ned i brønnen sammen med kollektorene. Data fra borerapporten er gjengitt i Tabell 1.

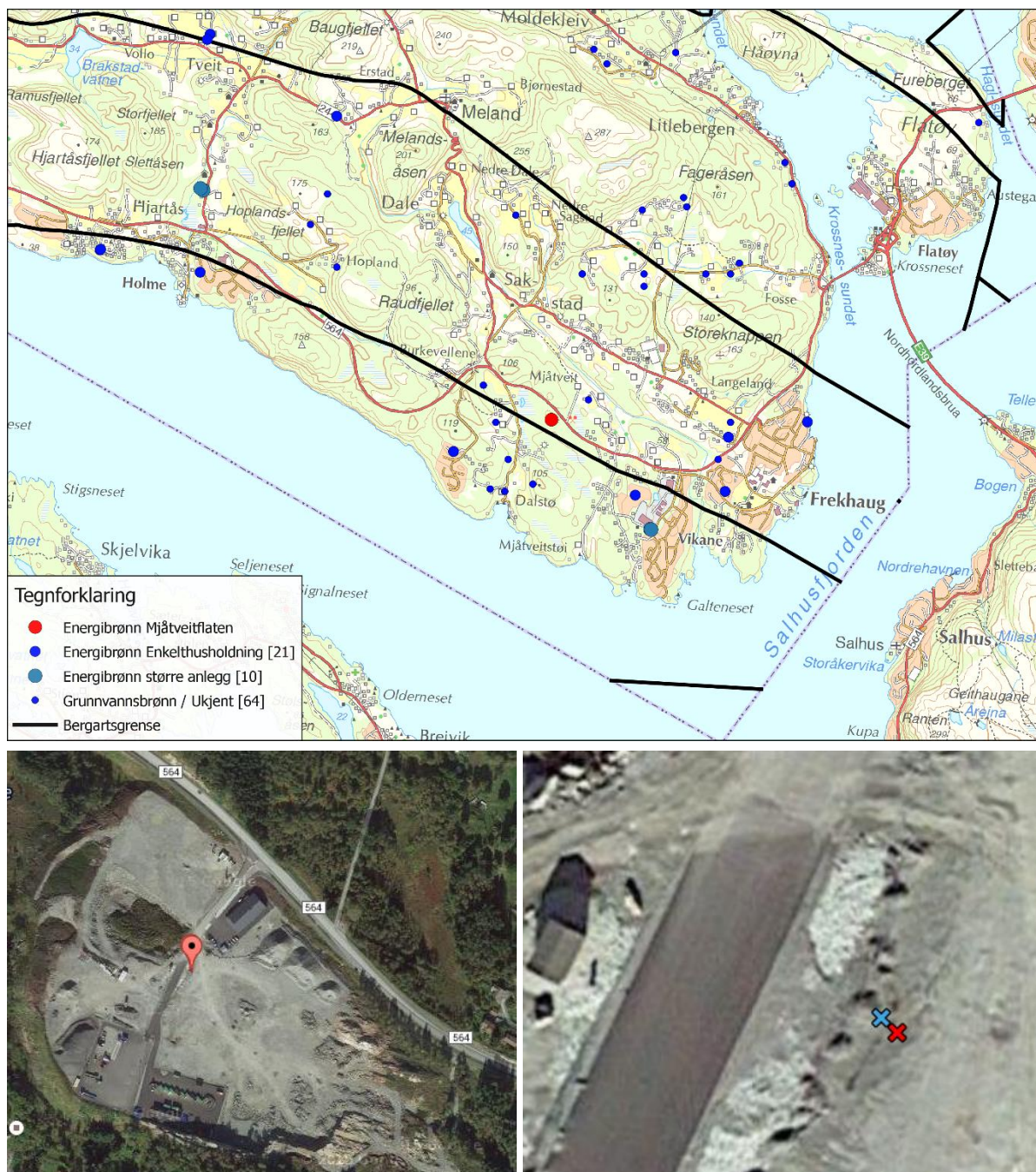
Tabell 1. Data fra borerapporten.

	Borehull A Østligste 2. side borerapport	Borehull B Vestligste 1. side borerapport
Brønnndybde	150 meter*	150 meter
Borehull diameter	140 mm	140 mm
Grunnvann	Tørt 0-75 meter Vanninnslag 75-95 meter (50-500 liter/time)	Tørt 0-90 meter Vanninnslag 90-100 meter (50-500 liter/time)
Boreretning	Skrå 25 grader	Skrå 25 grader
Foringsrør	6 m / 168 mm diameter	6 m / 168 mm diameter
Dybde til fjell	5 meter	4.5 meter

3.2 Installasjon av loggeutstyr

Den 18. november ble optiske kabler montert i de to borehullene. Se Figur 2 for bilder fra installasjonen og Figur 3 for måleoppsettet. Installasjon ble gjort ved å feste fiberen til kollektorslangen før kollektorslangen ble ført ned i borehullet. Den optiske fiberen hadde 1 mm diameter. En 150 meter lang kollektorslange ble ført helt ned i det østligste borehullet (borehull A). I det vestligste borehullet (borehull B) ble kollektorslangen kuttet 20 meter fra enden fordi borehullet var blokkert. Senere i uken ble kollektorslangen sammen med fibere ført inn til bygning i nærheten, og borehulls-åpningen ble begravet.

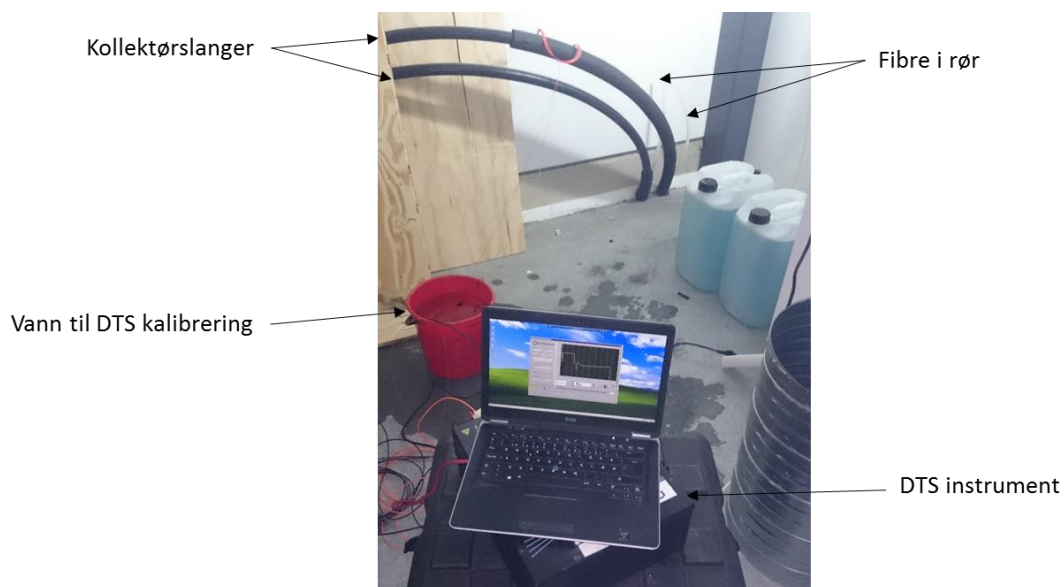
CMR returnerte til borehullene den 24. november for å utføre temperaturmålinger. Temperaturmålingene ble kalibrert ved å legge 10-20 meter fiber fra hvert borehull i en bøtte med vann der vanntemperatur ble målt med temperatur-prober. Eventuelle temperaturgradienter i vannet ble brutt ved intens røring i bøttene. Måledata viste at de to fiberne viste forskjellige taps-parametere mellom kontrollrommet og brønnen, sannsynligvis på grunn av mye press og bøyning av fiber. Dette vil kunne løses enkelt i en senere installasjon uten at det vil forhøye kostnader ved bruk av mer robust konstruksjon og løsninger.



Figur 1. Posisjonen til de nye energibrønnene på Mjåtveitflaten er vist på kart og satellittbilde. Koordinater for borehull A (rødt kryss) er 291940/6715053 (60.51760522, 5.20905628) og for borehull B (blått kryss) er 291939/6715054 (60.51761366, 5.20903706) (32N). Kilder posisjon energibrønner/grunnvannsbrønner og bergartsgrense: NGU datasett Berggrunn N50 og Nasjonal grunnvannsdatabase (GRANADA).



Figur 2. Bilder fra datainnsamlingen på Meland den 18. november. (a) Festing av fiber på kollektorslange for østre borehull. (b) Innfesting av fiber etter at slange er ført ned i borehull for henholdsvis østre og vestre borehull.



Figur 3. Måleoppsett for fiberoptisk temperaturmåling (DTS) benyttet for datainnsamlingen inne i det nye bygget på Meland.

3.3 Logging av temperatur i borehull

I Figur 4 er målt temperaturlogg fra de to energibrønnene fra 24. november 2015 vist. Måledata er korrigert for å kompensere for tap mellom kontrollrom og borehullet. Korreksjon for ulike tapsparametere mellom kontrollrommet og brønnen for de to borehullene er innarbeidet i kurvene som er vist. Systematisk usikkerhet i de korrigerede dataene er $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$.

Det var planlagt å gjøre flere målinger for å følge temperaturutviklingen i brønnene etter at anlegget var satt i drift. Det ble gjort nytt forsøk på måling i brønnene den 29 april 2016. Det viste seg at fiberen i begge brønnene var ødelagt like ved innføringen til det tekniske rom. Det lot seg ikke gjøre å skjøte fiberkabelen. Det antas at det ikke er tatt nok høyde for temperaturforlengelse i kollektorslange under drifting av anlegget, og at fiberen derfor har røket.

3.3.1 Temperaturlogg borehull A

For borehull A har temperaturkurven et minimum på ca. 40 meters dybde. Den høyere temperaturen ned hit skyldes temperaturpåvirkning fra overflaten. For borehull A viser temperaturloggen en jevn stigning i temperatur fra ca. 40 meter og ned til bunnen på 150 meter. Dette er en forventet oppførsel for borehull uten betydelig grunnvannsstrømning og formen på temperaturkurven ligner på det som er rapportert fra andre steder i Bergensområdet (95) (96). I (95) ble det målt temperatur som funksjon av dybde fra 180 til 500 meter i 9 borehull i 4 områder; Hosanger på Osterøy, Åsane, Fyllingsdalen og ved Haukeland Universitetssykehus. De fleste av disse borehullene hadde et temperaturminimum mellom 20 meter og 80 meters dybde. Registrert temperatur på 100 meters dybde i (95) varierte mellom $7,5^{\circ}\text{C}$ og $9,5^{\circ}\text{C}$, og borehullene på Mjåtveitflaten ligger dermed i det nedre området med rundt $7,5^{\circ}\text{C}$.

Temperaturen i borehull A stiger med ca. 0.5 grader fra 100 meter og ned til 150 meter, som gir en gradient på ca. 10 grader/km for dette området. Dette er noe lavere enn det som er observert i (95) der gradienten typisk ligger på 15 grader/km. En tilsvarende gradient på ca. 12-13 grader/km ble observert i Stavanger-området (96), mens det i Fyllingsdalen ble funnet gradienter opp mot 20 grader/km.

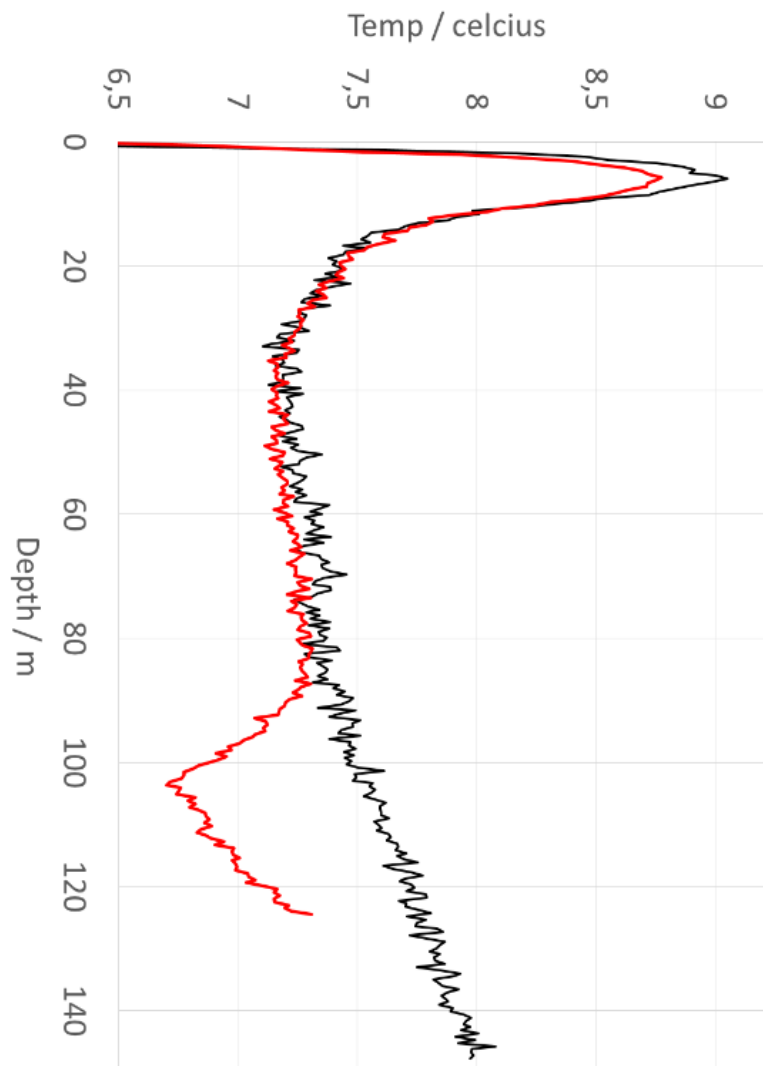
Den noe lave gradienten på Mjåtveitflaten kan delvis skyldes påvirkning fra sjø i nærheten. I tillegg er borehullet på Mjåtveitflaten ikke like dypt som borehullene som er vurdert i (95) (96), og det er derfor noe større påvirkning fra overflaten i området der temperaturgradienten er tatt ut.

3.3.2 Temperaturlogg borehull B

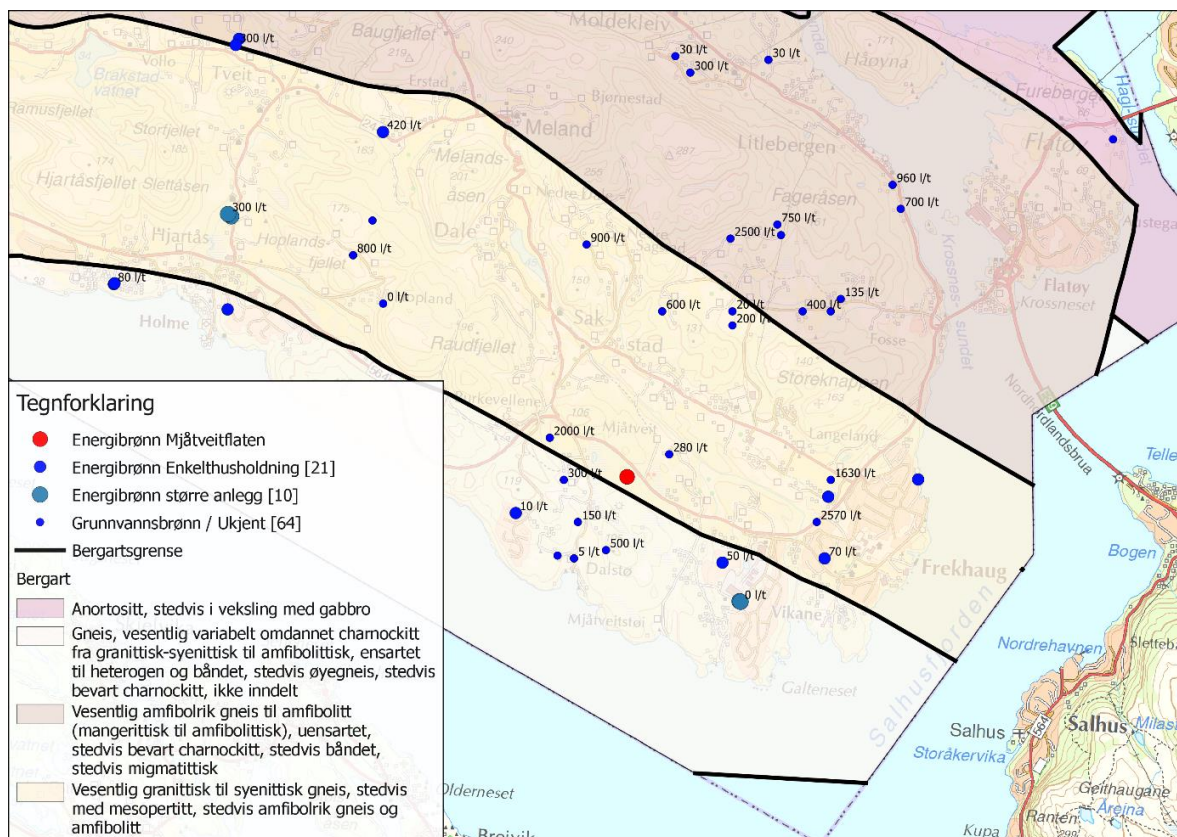
Som for borehull A, har temperaturkurven for borehull B et minimum på ca. 40 meters dybde. Fra minimumet på ca. 40 meters dybde øker temperaturen ned 80-90 meters dyp. Herfra synker temperaturen relativt kraftig. Dette kan skyldes at det er betydelig grunnvannsstrømning ved dybde 90 meter. Merk at borerapporten rapporterer grunnvannsstrømning i samme størrelsesorden for begge borehullene på mellom 50 og 500 liter per time. Grunnvannsstrømning som er registrert i nærliggende brønner i Nasjonal grunnvannsdatabase (GRANADA) er vist i Figur 5. Her ser man at det er en grunnvannsbrønn noen kilometer i retning nordøst der det er registrert grunnvannsstrømning på 2000 liter per time. Her ble det ifølge brønnrapport fra 1985 registrert en del skifte i fjellet. Slamfarge mellom hvert skifte i fjell ble rapportert som grå/svart. Høy grunnvannsstrømning ble registrert allerede fra 35 meters dybde og ned til brønnens dybde på 61 meter. I en annen brønn i nærheten ble det registrert grunnvannsstrømning på 1200 liter per time allerede fra 6 meters dybde. Det er for veldig varierende grunnvannsstrømning registrert for brønner i området. Den høye grunnvannsstrømningen kan skyldes en forkastning i området. Bergartsgrensene i Meland (Figur 5) tyder på at man er tett inntil en bergartsgrense.

I følge rapporten (97) om grunnvann i kommunene Meland og Austrheim består berggrunnen i kommunen av gabbro, amfibolitt, amfibolittisk gneis, anortositt, mangeritt og feltspatisk gneiser. I Figur 5 er det gitt en oversikt over bergarter på Meland sammen med bergartsgrenser. Et borehull i gabbro, amfibolitt og amfibolittisk gneis vil ifølge (97) sjelden gi vannmengder over 0.2 liter per sekund. De øvrige bergartene er bedre vanngivere, og vil normalt gi vannmengder inntil 0.4 liter per sekund i et borehull. På grunn av små nedbørfelt og sterk overflateavrenning, vil vanngiveren til bergartene de fleste

steder i Meland trolig være mindre enn det som er normalt for bergartene. I Meland var per 1992 gjennomsnittskapasiteten pr brønner på 0.14 liter per sekund og 80% av brønnene ga mindre enn 0.25 liter per sekund. Merk at en grunnvannsstrømning på 50-500 liter per time som gitt i borerapporten i dette tilfellet tilsvarer 0.01 – 0.14 liter per sekund.



Figur 4. *Temperaturlogg fra energibrønner på Meland. Svart (borehull A, østligste borehull) og rød kurve (borehull B, vestligste borehull) er viser temperaturlogg for hver av de to brønnene.*



Figur 5. Bergarter, bergartsgrenser, energibrønner og grunnvannsbrønner i området. Grunnvannsstrømning er vist for de brønner der informasjonen er tilgjengelig. Kilder posisjon energibrønner/grunnvannsbrønner og bergarter: NGU datasett Berggrunn N50 og Nasjonal grunnvannsdatabase (GRANADA).

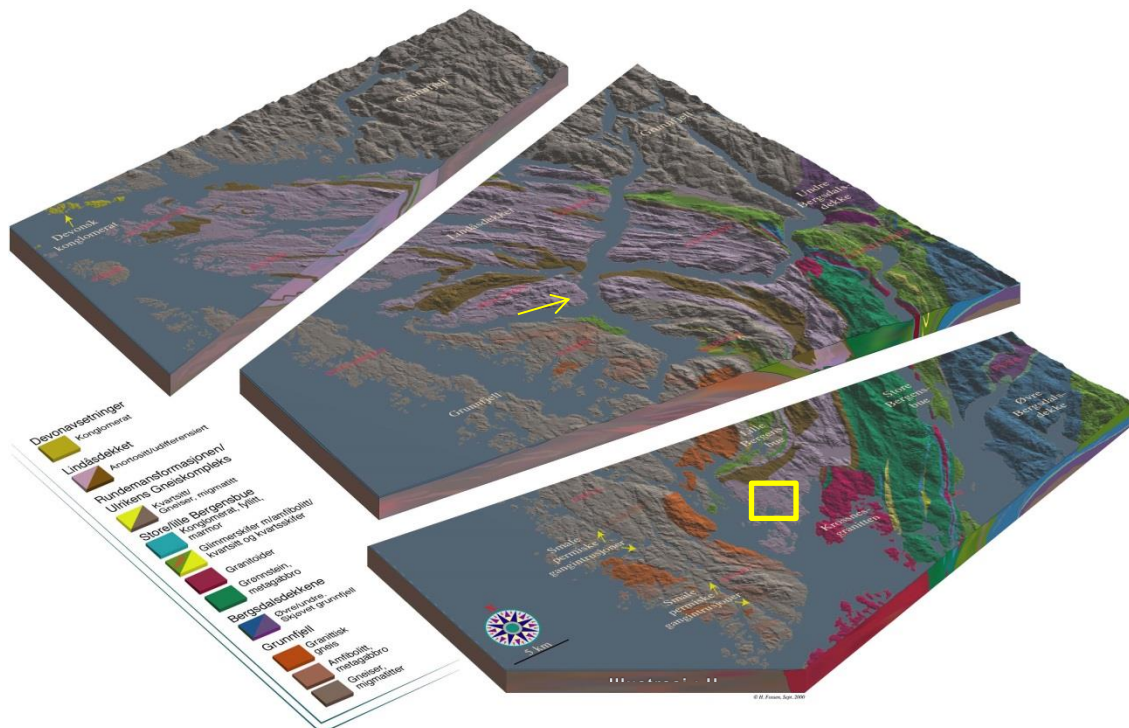
4 Geologisk kartlegging av ByBo`s planlagte utbyggingsområde

Konduktivitet og varmelagringspotensiale styres i stor grad av bergartenes termiske konduktivitet, videre ventes det at grunnvann vil utgjøre en stor effekt på borehullslagrene. En viktig problemstilling baserer seg på om det er grunnvannstrøm i området, hvilken retning denne går i og hvordan grunnvannet kan påvirke et potensielt grunnvarmelager.

4.1 Regional geologi

Den geologiske kartleggingen er utført i og rundt det planlagte utbyggingsfeltet til ByBo Ådland. Det er faktorene som kontrollerer grunnvann og varmeledningsevne i berggrunnen er kartlagt, dette er bergartstype (mineralogi), sprekkesoner, topografi, vassdrag, sjø og innsjøer og bergspenning.

Berggrunnen på Bergenshalvøya, Nordhordland og Osterøy består av de karakteristiske Bergensbuene. Dette er en foldestruktur som strekker seg 80 km i nord-sør retning fra Os i sør til Fensfjorden i nord (Figur 6). Buene består av bergartsdekker av svært ulik opprinnelse og aldre, selve buestrukturen ble dannet under den kaledonske fjellkjedefoldingen for ca. 400 millioner år siden. Buestrukturen er lett synlig i terrenget og på satellitt/flyfoto og disse styrer i stor grad retning av dalførere, innsjøer og fjorder. Et godt eksempel er dalføret hvor Bergen sentrum befinner seg, denne går langs lett eroderbare skifre i den «lille bergensbuen». Byfjellene derimot, Ulriken, Blåmannen og Rundemannen befinner seg i «hardere» gneisser og kvartsitter tilhørende bergmassivet Blåmandekket. De andre byfjellene Løvstakken og Damsgårdsfjellet befinner seg i gneisser tilhørende grunnfjellet under skyvedekken i Bergenbuene.



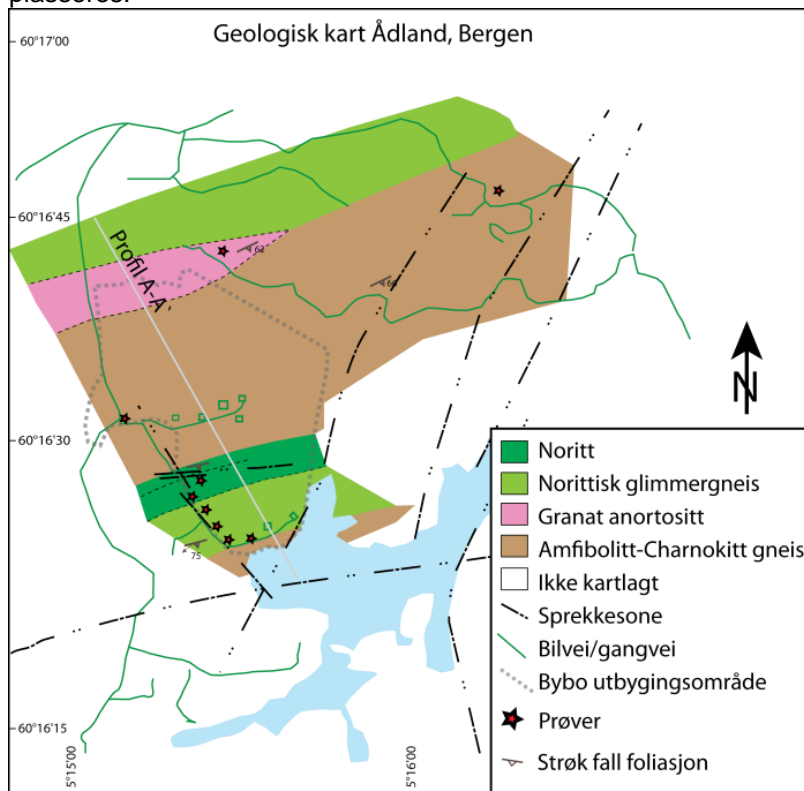
Figur 6 Geologisk illustrasjon av Bergensbuene. Gul pil viser lokaliseringen av brønnene testet på Meland (beskrevet i kapittel 3), gul firkant viser lokaliseringen av Bybos utbyggingsområde på Ådland. Lindåsdekket er markert med lilla og brune farger og utgjør lignende bergarter fra Os i sør til Austrheim i nord. Illustrasjon brukt med tillatelse fra Haakon Fossen

Bybo prosjektet i Ådland og de fiberoptiske testene i brønnene på Meland befinner seg i bergarter tilhørende Lindåsdekket, som utgjør den midterste og største delen av Bergensbuene. Lindåsdekket

strekker seg fra Fana i sør til Austrheim i nord og bergartene består sterkt omdannede (metamorfe) magmatiske bergarter av typen anorthositt, charnokitt og noritt samt noen andre feltspatrike gneiser. Egenskaper i forhold til grunnvann og varmeledning forventes å være relativt like i de to studerte områdene. Anorthositt sees i felt som lyse nesten hvite bergarter, et godt eksempel er området rundt Lagunen kjøpesenter og Sandsli. Denne bergarten består av nesten 90% av mineralet plagioklas, derav den homogene fargen. Charnokitt ligner på granitt i farge, da den inneholder mye lyserød kalifeltspat, ulikt fra granitt er tilstedeværelsen av mørke pyroksenminerale og relativt lavt kvartsinhold. Lokale varianter av charnokitt er blant annet mangeritt (av Manger på Radøy) som inneholder mye apatitt, et fosfatmineral som ofte er knyttet til næringsrikt jordsmonn. Noritt, er av navnet en bergart også navngitt i Norge, denne ligner veldig på Gabbro, da den er mørk i farge, av og til med hvite spetter av plagioklas, eller i noen tilfeller nesten helt svart bestående av pyroksen og plagioklasfeltspat. Bergartene i Lindåsdekket er også sterk preget av deformasjon og metamorfose, i form a folding, forgneising og skifriighet og ofte har bergartene en klar gjennomgående foliasjon.

4.2 Geologisk kartlegging av Ådland

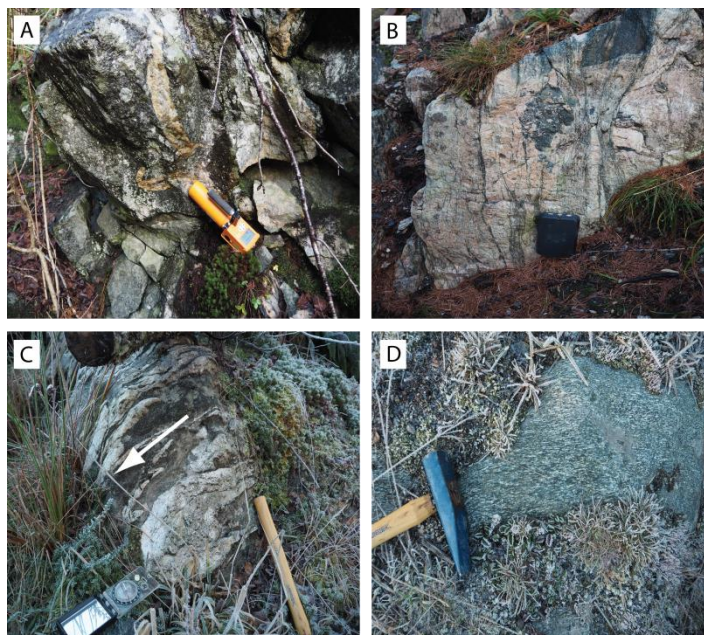
I geologisk kartblad 1:50000 Bergen (98) er Ådlandsområdet indikert med granittiske syenitiske og monzodioritiske dypbergarter for det meste charnokitter og granulitter. Det kartlagte området på Ådland er definert av Bybo's planlagte utbyggingsområde (Figur 7). Geografisk består Ådland og områdene rundt av lavtliggende åsrygger og koller på 20-40 m.o.h. avgrenset av smale dalfører og små innsjøer og innlandspoller. Dalførene og innsjøene følger stort sett den øst-vest gående trenden som er retningen for Bergenbuene i området, men typisk er også nord-sør gående dalfører som følger forkastninger og sprekkesoner. Området er delvis tettbygd, med en del gårdsbruk, skogsområder og friluftsområder. Området er i stor grad dekket av vegetasjon og jordsmonn slik at den geologiske kartleggingen er avhengig av noen få veiskjæringer samt korrelasjon mellom linementsanalyse fra satellittfoto og prøvetagning. Kartleggingen har vært gjort med hensyn til berggrunn, sprekkekaraktistikk og varmeledningsevne. Det har vært fokus på hvordan eventuelle energibrønner bør designes og plasseres.



Figur 7 Geologisk kart av det planlagte utbyggingsområdet til Bybo. Berggrunnen består hovedsakelig av mørke mafiske bergarter, såkalte noritter og amfibolitter, med innslag av lysere charnokitter.

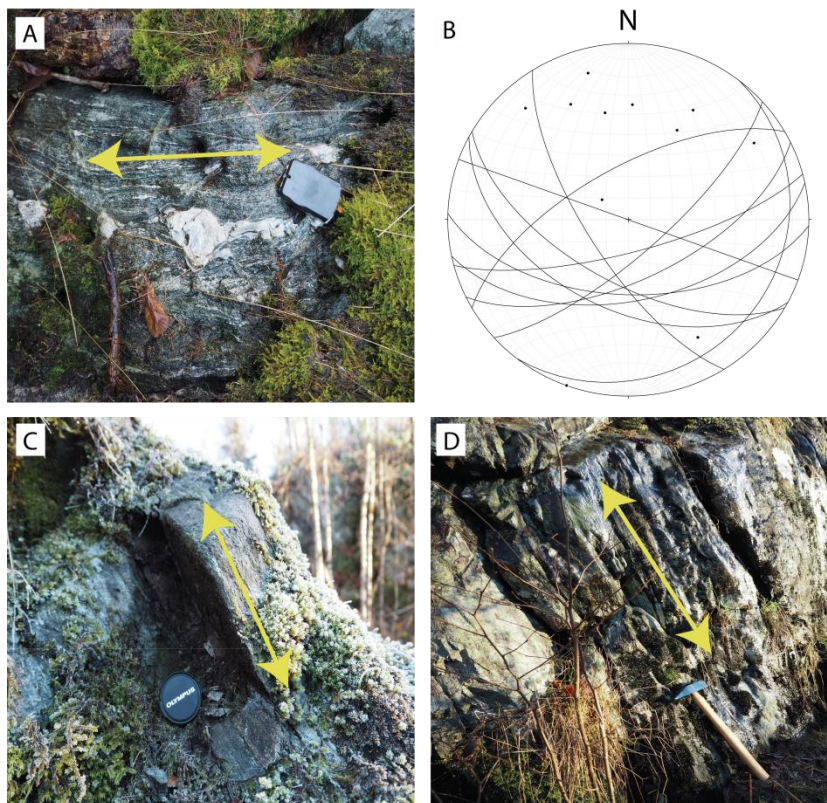
4.2.1 Bergartstyper

4 ulike bergartstyper er kartlagt og prøvetatt i området (Figur 7, 8 og 13), amfibolitt-charnokitt gneis, anorthositt, noritt og norittisk glimmergneis. Bergartene består i hovedsak av en mørk mafisk grunnmasse, med innslag av lyse ganger/soner av lys rosa charnokitt (Figur 8A, B) og hvite anortosittganger (Figur 8C). Området i nord har overvekt av den lyse charnokitten, mens i sør finnes en sone med mer mafisk og mørkere noritt (Figur 8D) og norittisk glimmergneis (Figur 9C).



Figur 8 *Bergartstyper i studieområdet A) Amfibolitt-Charnokitt, B) Charnokitt, C) Foldet Anorthositt, D) Noritt*

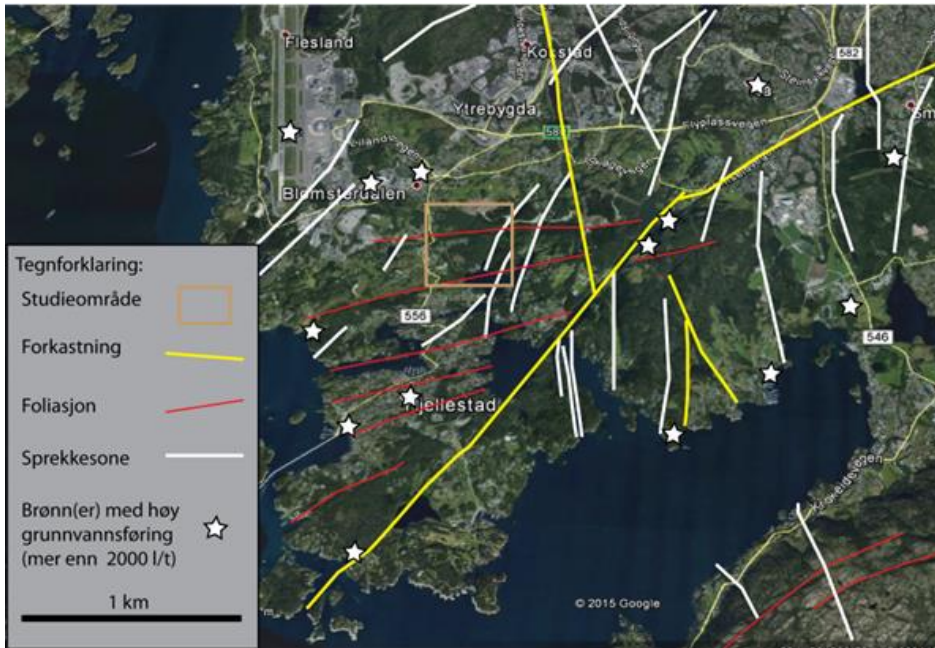
Berggrunnen veksler mellom massive noritter med liten skiffrighet, til mer skiffrige og folierte soner hvor glimmerandelen øker betraktelig (Figur 9). Bergartene, med unntak av mer massive grovkornede charnokittene og norittene, bærer preg av en gjennomgående gneis-foliasjon som stedvis er foldet i tette isoklinale folder. Foliasjonen er definert av langstrunke parallelorienterte feltspat, pyroksen og glimmerminerale. Foliasjonen og foldeakseplanene faller mellom 20-80° mot sørvest, stort sett relativt steilt mellom 45-65° (Figur 9).



Figur 9 *A Gneissfoliasjon i charnokittisk gneiss, B) Schmidt nett som viser orienteringen av foliasjonen i form av storsirkler og poler. Plottet viser en overveiende øst vest orientering, men lokale foldestrukturer gir noen variasjoner. C) og D) Norritisk glimmergneis med steil skifrihet, mange steder sprekker denne skifriheten opp og kan være potensielle grunnvannsledere.*

4.2.2 Sprekkekartlegging

Sprekkekartleggingene er foretatt gjennom flyfoto og topografiske kart for å detektere de vanligste sprekkesystemene i området.

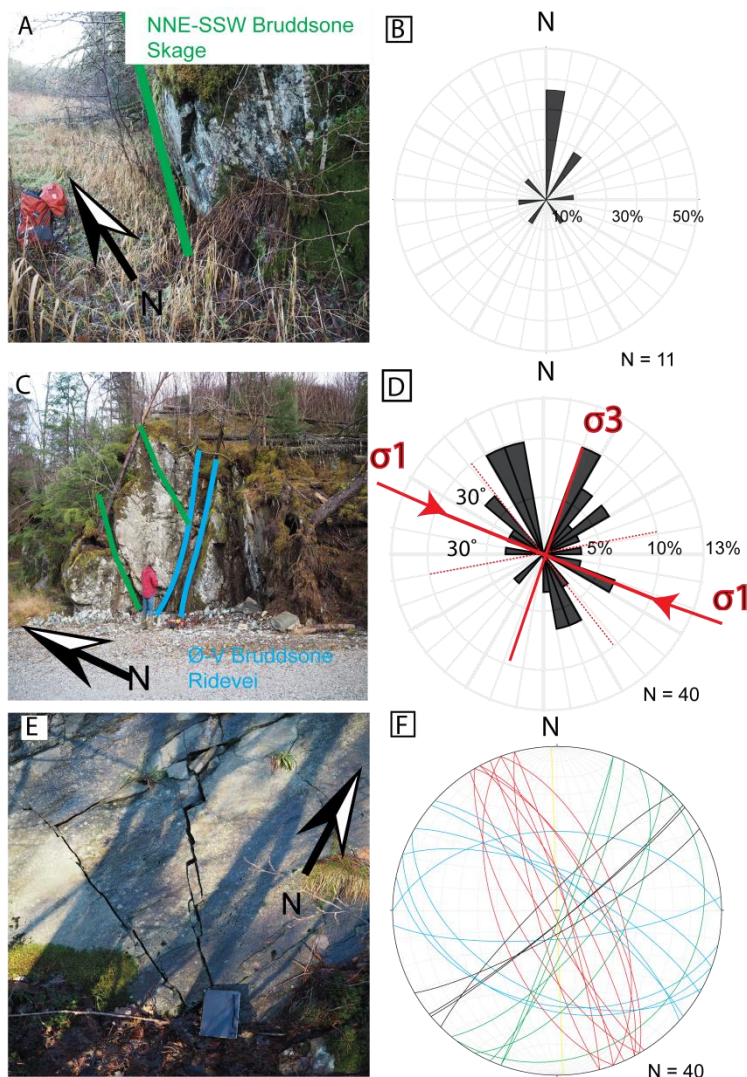


Figur 10 Lineamenter i området Flesland-Fana med indikert gode grunnvannsbrønner (se detaljer i figur 12).

I området Flesland-Rådal-Fana er det i hovedsak tre lineamentsorienteringer:

- Øst vest lineamenter – foliasjon og strøket til Bergensbuene (markert med rød linje i Figur 10)
- NØ-SV lineamenter - sprekkesoner og en større forkastning fra Hjellestad-Smørås
- N-S til NNØ-SSV sprekkesystem

Sprekkesystemene har lignende orientering som fleste andre studier på sprekkesystem i Bergensområdet (99). Lokalt i Ådland finnes også fire hovedsprekkeretninger, NNØ-SSV, NNV-SSØ, Ø-V og NØ-SV. Det er spesielt NNØ-SSV og NNV-SSØ som danner de store lineamentene og dalførene i området. I disse dalførene er det observert tydelige sprekkflater på sidene av dalene, men det er ikke mulig å studere selve sprekkesonen da disse vanligvis er dekket av jordsmonn og vegetasjon. Basert på studier i områder med mindre overdekning er det nærliggende å tro at disse lineamentene er dannet på grunn av såkalte sprekkekorridorer (100) (101). Som vist på kartet er disse store sprekkesonene fra noen 100 m opptil noen få km lange. Det er usikkert om disse er sammenhengende. Upubliserte data fra Sotra og Øygarden samt Bergen vest (Mathiesen 2013), indikerer at slike sprekkesoner kan være opptil flere km lange og sammenhengende. Sprekkefrekvensen intern i disse sonene kan være mellom 10 og 100 sprekker per meter, et stort potensial for høy permeabilitet. Mellom disse sprekkesonene er det som oftest mye lavere sprekkerefrekvens bestående stort sett av isolerte sprekker. I Ådlandsområdet ble det målt i veiskjæringer i gjennomsnitt en sprekk hver annen meter i områdene utenfor lineamentene. De mindre sprekkene sammenfaller ganske bra med orienteringen av de store sprekkene. Mange steder spesielt i områder hvor foliasjonen står steilt dannes det sprekker parallelt med foliasjonen i stort sett en øst vest gående retning. Dette kan være knyttet til aktivering av foliasjonsplan orientert parallelt med bergspenningen i området. Den regionale bergspenningen kan påvirke aperturen og kan aktivere/åpne eksisterende sprekker, noe som kan ha stor betydning for grunnvannstrøm (100). Hovedspenningsretningen på vestlandet er orientert 120° (N70°V) med en styrke på mellom 5-30 MPa (102), dette er parallelt med foliasjonsplanet i Ådlandsområdet.



Figur 11 Sprekkesoner i studieområdet. A) tydelig NNØ-SSV lineament definert av sprekkelflate B) Rosediagram som viser fordelingen av de mest fremtredende lineamentene i området basert på flyfoto tolkning (se Figur 7). C) Ulike sprekkesoner i blotning nord i området. D) rosedigram som viser fordelingen av sprekker målt i blotninger og antatt retning for bergspenning i området. E) NNW-SSØ orienterte sprekker sør i feltområdet. F) Storsirkler som indikerer ulike sprekkesett fra blotninger i studieområdet (samme data som i 11D)

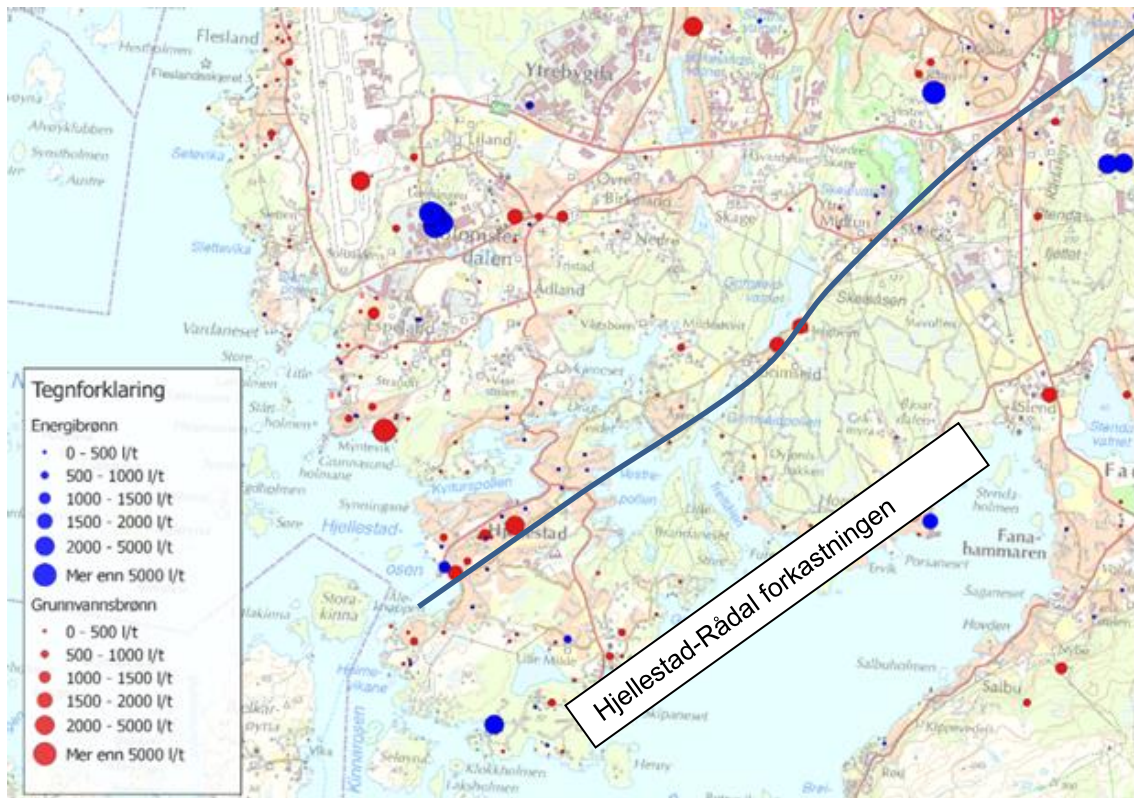
4.2.3 Grunnvannspotensialet

Data fra Norsk Grunnvannsdatabase (Granada) (Figur 12) viser at det er stor variasjon i grunnvannstrøm i området Flesland-Rådal- Fana. Grunnvann kan variere stort og ha store lokale forskjeller, dette er knyttet til tilstedeværelsen av sprekkesoner, bergartstype, orienteringen og dypet av borehullet, den topografiske plasseringen av borehullet, bergspenning. I Figur 12 er det forsøkt å sammenligne lineamentene med grunnvannstrøm og her vises at det er en korrelasjon mellom sprekkelineamenter og høye grunnvannsverdier (<2000 l/time i området, men at variasjonen er stor langs samme lineament (Figur 12). Med andre ord det er ikke gitt at en sprekkeseone vil gi stor grunnvannstrøm. Dette er i samsvar med funn gjort av Henriksen (2006) som sammenlignet brønner og strukturelle lineamenter i Sogn og Sunnfjord området. Han peker på at topografi og spenningsfelt er viktigere faktorer fremfor sprekkesoner. Brønner i en radius på 2km rundt det planlagte utbyggingsområdet viser generelt en relativt lav grunnvannstrøm mellom 20 og 700 l/t (0,005- 0,2 l/s), det høyeste nivået er funnet nord for området i Blomsterdalen på opptil 1600 l/t.

- Topografi: Ådland og området mellom Flesland-Fana er karakterisert av et relativt lavt relieff med åsrygger på mellom 20 og 40 m.o.h. avgrenset av grunne sjøvannpoller og små innsjøer.

Dalfører er preget av mindre bekkefar og myrer. Et slikt flatt landskap vil lavt tilsig og små topografiske høydeforskjeller vil kunne gi liten gravitasjonsstyrt grunnvannstrøm.

- Sprekker: Som beskrevet over er områdets topografi styrt av sprekeretning samt foliasjonsretning. De fleste dalfører og åsrygger ligger langs NNW-SSØ og NNØ-SSV lineamenter som i felt er påvist å være knyttet til større sprekkesoner. Slike sprekkesoner er vist og være gjennomgående, men kan ofte være knyttet til lokale sedimentinnfyllinger og i mange tilfeller er disse sprekkene også forbundet med økt leirdannelse (103) (104) noe som kan føre til forsegling av sprekkesonen. Dette kan forklare de uklare sammenhengene når det gjelder grunnvannspotensial langs sprekkesonene. Et eksempel er Hjellestad-Rådal forkastningen (Figur 12), hvor grunnvannspotensialet viser stor variasjon langs forkastningen. Øst-vest gående dalfører er knyttet til bergartsgrenser og foliasjon, men det er også observert økt sprekkefrekvens i denne retningen. Foliasjonen ligger mange steder steilt og sprekker opp, denne kan derfor opptre som grunnvannsførende sprekker.
- Berggrunnstype: Bergartene Noritt, Amfibolitt og Charnokitt er vist i NGU rapporter, blant annet (105) som relativt lave grunnvangivere, mellom 0,1 og 0,4 l/s.
- Spenningsfelt og sprekeretning: Den lave topografien i området vil det antas at spenningen er orientert likt med det regionale spenningsfeltet. Dette vil som diskutert over føre til at sprekker i Ø-V til NV-SØ vil være under kritisk spenning. Dermed kan de øst vest gående sprekkorienteringene være viktige i sammenheng med grunnvannsstrøm.



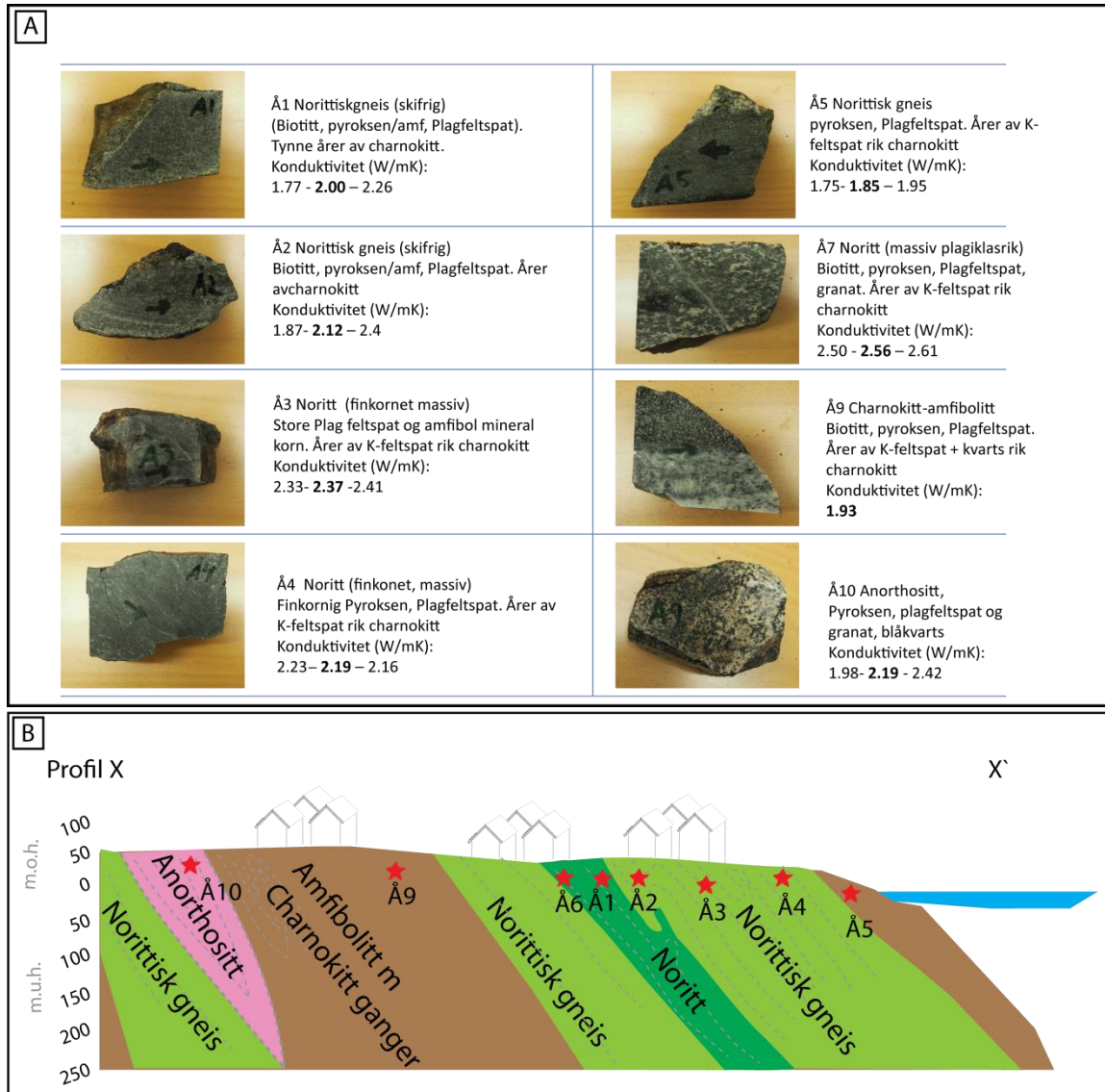
Figur 12 Energibrønner og grunnvannsbrønner i området Flesland-Fana. Grunnvanns-strømning (L/minutt) er vist for de brønner der informasjonen er tilgjengelig. Kilder posisjon energibrønner/grunnvannsbrønner og bergarter: NGU datasett Berggrunn N50 og Nasjonal grunnvannsdatabase (GRANADA).

4.2.4 Varmeledningsmålinger

Det ble samlet 10 prøver for varmeledningsmålinger (Figur 13). Målingene ble gjennomført av Niels Bo Jensen ved Institutt for Geovitenskap, UiB ved bruk av et TCS (Thermal Conductivity Scanner), et instrument av Lippman og Rau. Dette er et instrument utviklet av Yuriy Popov, som bruker en varmelampe i kombinasjon med infrarøde temperaturindikatorer. En fordel med denne metoden er at den tar hensyn til bergartens heterogenitet i forhold til foliasjon, ofte har metamorfe eller sedimentære

bergarter høyere ledningsevne langs foliasjon/lag og lavere på tvers (106). Prøvene som er tatt, må prepareres ved at de kuttes i firkantede stykker. De må være mer en 4 cm tykke for å unngå uønskede temperaturvariasjoner. I tillegg males flaten, som skal måles, svart for å unngå variasjoner knyttet til prøvens farge. Prøvene kuttes slik at det kan måles parallelt og perpendikulært på foliasjonen.

Den massive noritten hadde høyest varmeledningsevne på ca 2,5 W/mK, mens den norittiske gneissen hadde de laveste målingene med en konduktivitet på mellom 1,9 til 2,1 W/mK. De folierte og skifrige bergartene viste stor grad av anisotropi hvor målinger foretatt parallelt med foliasjonen er signifikant større enn målinger foretatt perpendikulært (se tabell i Figur 13). Sammenlignet med Lito databasen til NGU så er generelt sett konduktivitetene målt på Ådland lave, noe som kan knyttes til fraværet av kvarts i prøvene, samt at mange av prøvene har høyt innhold av glimmer.



Figur 13 A) Prøver brukt i varmeledningmålingene. Varmeledningsevnen er indikert med målinger gjort perpendikulært –gjennomsnitt- parallelt med foliasjon. B) N-S profil over feltområdet som viser fordelingen av de mest vanligste bergartene og ekstrapolasjon ned i undergrunnen.

4.3 Effekt av grunnvann og sjøvann på energiuttak og lagring i grunnen. (Brønndesign basert på de geologiske dataene)

Det antas generelt å være høyere grunnvannsstrøm langs lineamentene fordi det er høyere oppsprekking i disse sonene. For Ådlandsområdet er det flere faktorer som kan redusere sannsynligheten for å påtreffe større grunnvannssoner langs lineamentene. Dette feltstudiet har påvist relativt lav sprekketetthet. Området er flatt med liten topografi som kan gi lokale hydrauliske trykkforskjeller. Sprekkeorientering i forhold til bergspenninger heller ikke gunstig med tanke på store åpne sprekkesoner. Det er ikke påvist god korrelasjon mellom sprekker og grunnvann i eksisterende brønner.

Det er fortsatt usikkert hvordan grunnvannssoner påvirker energiuttak og energilagring i brønnparker. Teoretisk vil grunnvannsstrøm transporterer magasinert varme vekk fra lageret. Erfaringer fra blant annet bergvarmeanlegget ved NIVA bygget i forskningsparken i Oslo viser at man kan magasinere varme og heve temperaturen i energibrønner med ekstrem grunnvannstrømning. Det antas at varmen magasineres i berggrunnen mellom grunnvannssonene (Helge Skarphagen pers. komm.). Effekten av grunnvannstrømning på energiuttak og lagringskapasitet avhenger av temperatur og tetthet på grunnvannet og i berggrunnen, samt om det er flere grunnvannssoner som krysser brønnen slik at man kan få satt opp gravitasjonsstrømmer i brønnen.

Et annet aspekt er at disse sonene kan være knyttet til sjø og innsig av sjøvann. Sjøvann har gjerne lavere temperatur enn grunnvannet om vinteren når det oppvarmingsbehovet er størst, mens sjøvann gjerne har høyere temperatur en grunnvann om sommeren. Kobling mot sjøvann eller en eller annen form for temperaturpåvirkning fra sjøvann bør kartlegges da dette kan påvirke energiuttaket fra energibrønner. Sannsynligheten for påvirkning av sjøvann er bestemt av avstand til sjø samt retning på lineamentene.

I og med at tettheten til grunnvannet er en funksjon av temperaturen vil temperaturendringer i vannet sette opp strømninger. Disse gravitasjonsstrømningene avhenger av temperatur og temperaturforskjellen. Spesielt hvis temperaturen ligger i nærheten av 4,0 °C, temperaturen der grunnvannet er tyngst, vil det være komplisert å forutsi effekten av temperaturendring for energiuttaket.

Tidevannsforskjeller kan påvirke grunnvannsnivået flere hundre meter fra sjøen (ref. test brønner ved NGU, Trondheim). Tidevannsforskjellen i Bergensområdet er vanligvis under 1 m, men for et stor brønnpark kan man miste opp til 1 m effektiv brønndybde pr brønn ved lavvann hvis grunnvannsnivået i området er tidevannspåvirket. Tidevannseffekten kan også sette opp lokale hydrauliske gradienter som påvirker grunnvannstrømning.

I teorien vil det være større sannsynlighet å oppnå god vanngiverevne ved å bore brønnene skråstilt (50 grader mot nord) mellom de største lineamentene for å fange opp flere vanngivende sprekker assosiert med foliasjon og skifrihet. Det er i praksis store usikkerheter hvordan brønnen avviker med dypet. Sannsynligheten er høy for at brønnen bores i en annen retning enn den planlegges.

Distribuert fiberoptisk temperaturmåling i testbrønner før etablering av en større brønnpark vil gi informasjon om lokale temperaturforskjeller i brønnen og eventuell påvirkning av grunnvann og sjøvann. Bruk av fleksible løsninger med mulighet for å styre hvordan man utnytter forskjellige brønner i en brønnpark med hensyn på energiuttak og energilagring kan optimalisere energiuttaket. Dette krever at man har god overvåking av temperatur i brønnparken.

5 Design av brønnpark for Zero Village Bergen

SINTEF har vurdert det totale varmebehovet for Zero Village Bergen i et separat studie (107). I dette kapitlet blir det sett på design og størrelse av brønnpark for å dekke dette varmebehovet.

Studien som er gjort er scenario-basert, og er utført ved hjelp av programmet EED (Earth Energy Design) v.3.16. For basis-tilfellet er det ikke lagt opp til lading av brønner på sommeren, og det er ikke antatt noen positiv effekt på grunn av grunnvannsstrømning. Tre andre scenarier er simulert

- med lading av brønnene sommerstid,
- økt varmeoverføring på grunn av grunnvannsbidrag
- redusert effektlast

De ulike scenariene som er vurdert er listet opp i Tabell 2. Det er også gjort simuleringer med kombinasjoner av disse scenariene

EED simulerer optimale brønnparkdesign for et gitt sett med input-parametere. Optimaliseringen gjøres innenfor et sett med begrensninger, blant annet med tanke på minimum/maksimum avstand mellom borehull, minimum/maksimum borehull-dybde. For en brønnpark som ikke benyttes til lagring vil stor avstand mellom brønnene være gunstigst med hensyn på antall brønner og totalt antall boremeter. Samtidig er det av plass- og kostnadshensyn ikke hensiktsmessig å ha for stor avstand mellom brønnene

Inputdata for simuleringene er hentet fra Bybo, UNI og Sintef og gjengitt i seksjon 5.1.

Tabell 2. Oversikt over de ulike tilfellene som er simulert i EED.

Tilfelle	Kommentarer
Case Standard	Grunnlagsdata fra ByBo, UNI, og Sintef
Case Energilagring	Lading av brønnene i 4 måneder fra mai til august
Case Grunnvannsbidrag	Økt varmeoverføring i grunnen pga grunnvannsbidrag
Case Effektreduksjon	Halvert effektlast

5.1 Inputdata for EED simuleringer

I simuleringene for Zero Village Bergen er det brukt standardverdier for temperatur i grunnen og varmestrøm på henholdsvis $T_0=7,7$ K og $q=0,05$ W/m². Temperaturen målt i brønnene på Meland var 7,2 °C på 30 m dybde mens temperaturen målt på Osterøy, i Åsane og ved Haukeland sykehus var henholdsvis 8,0 °C; 7,1 °C og 9,3 °C (95) og i Fyllingsdalen 7,3 °C (96). Varmestrøm målt i det 500 meter dype borehullet i Fyllingsdalen er 0,072 W/m². Siden Løvestakkgranitten i Fyllingsdalen er radioaktiv med et høyt innhold av uran, thorium og kalium antas det at varmestrømmen er lavere på Ådland enn i Fyllingsdalen.

Det ble innledningsvis brukt varmeledningsevne for berggrunnen på 3,0 W/mK noe som er høyere enn varmeledningsevne som UNI målte. Det er seinere blitt supplert med simuleringer med varmeledningsevne for berggrunnen.

I EED simuleringene er det også mulig å variere type kollektorslange og kollektorvæske. For simuleringene som presenteres her er det valgt standard singel U kollektorslange fylt med standard kollektorvæske HX24 med tilsvarende egenskaper som 24% Etanol.

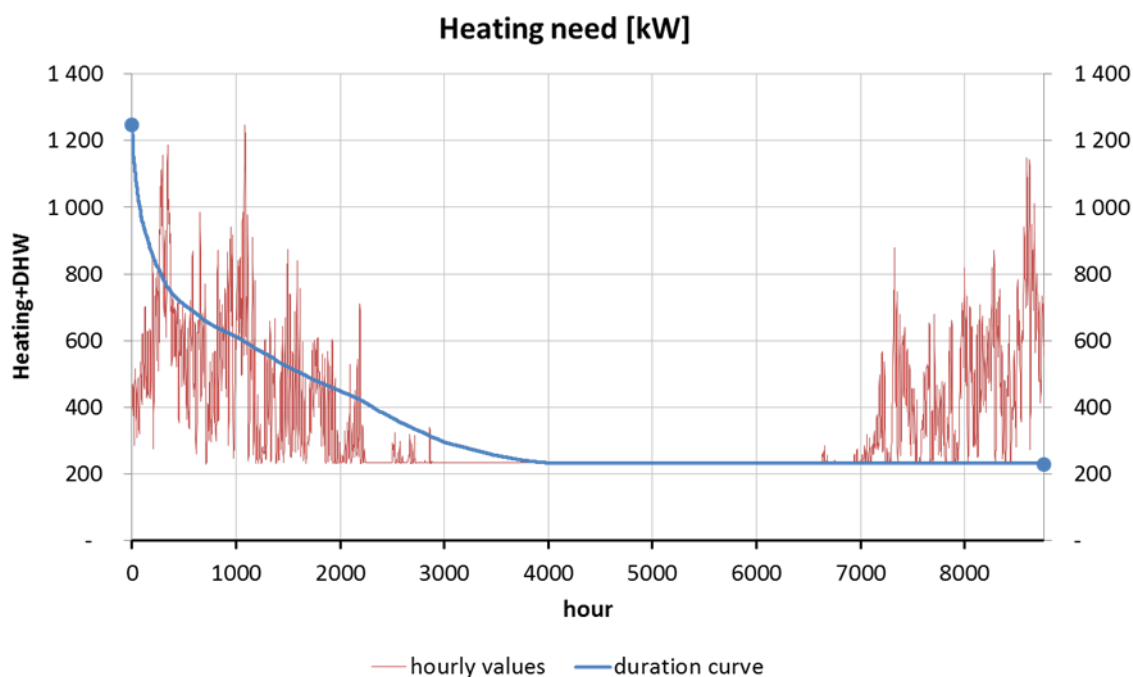
Data for varmeuttak for oppvarming og varmtvann som er benyttet som basis for simuleringene (Figur 14) er hentet fra SINTEF (107). EED krever input av varmebehov på månedsbasis. Basert på Figur 14 er det derfor laget et estimat av månedlig fordeling av energi-behov fordelt på oppvarming og varmtvann per måned (Figur 15) samt en oversikt over spisslast per måned (Figur 16).

En samlet oversikt over inputdata for EED simuleringene er gjengitt i

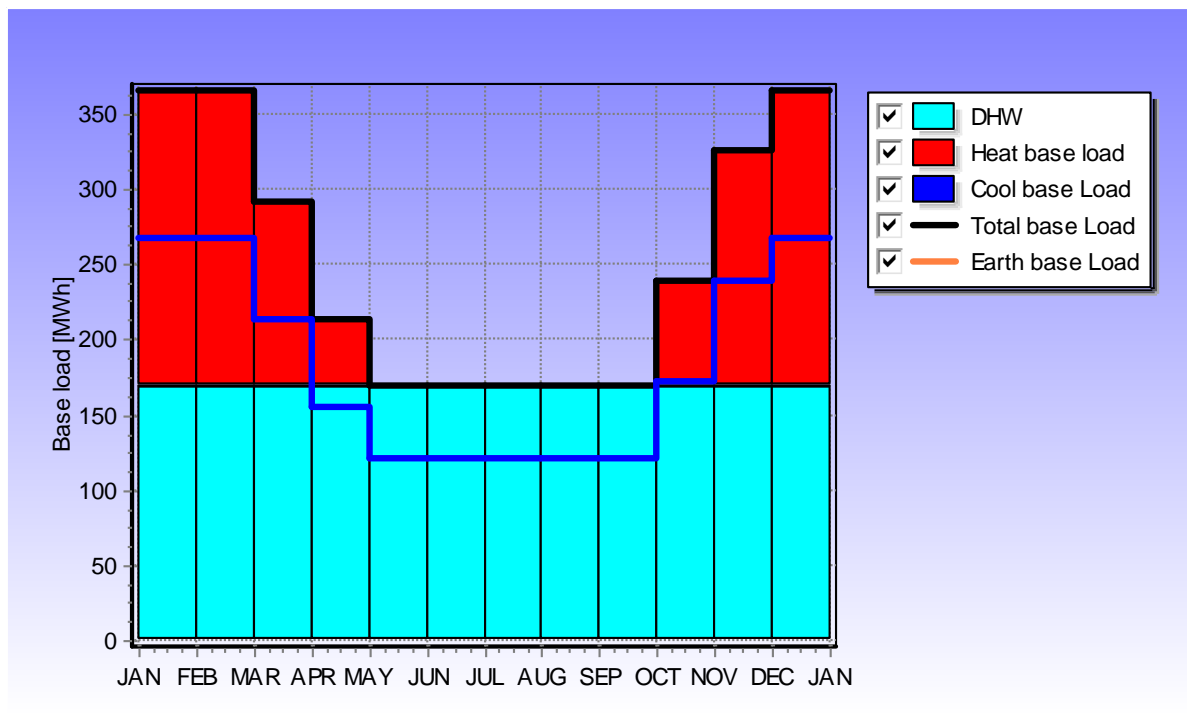
Tabell 3.

Tabell 3. Oversikt over inputdata for EED simuleringene.

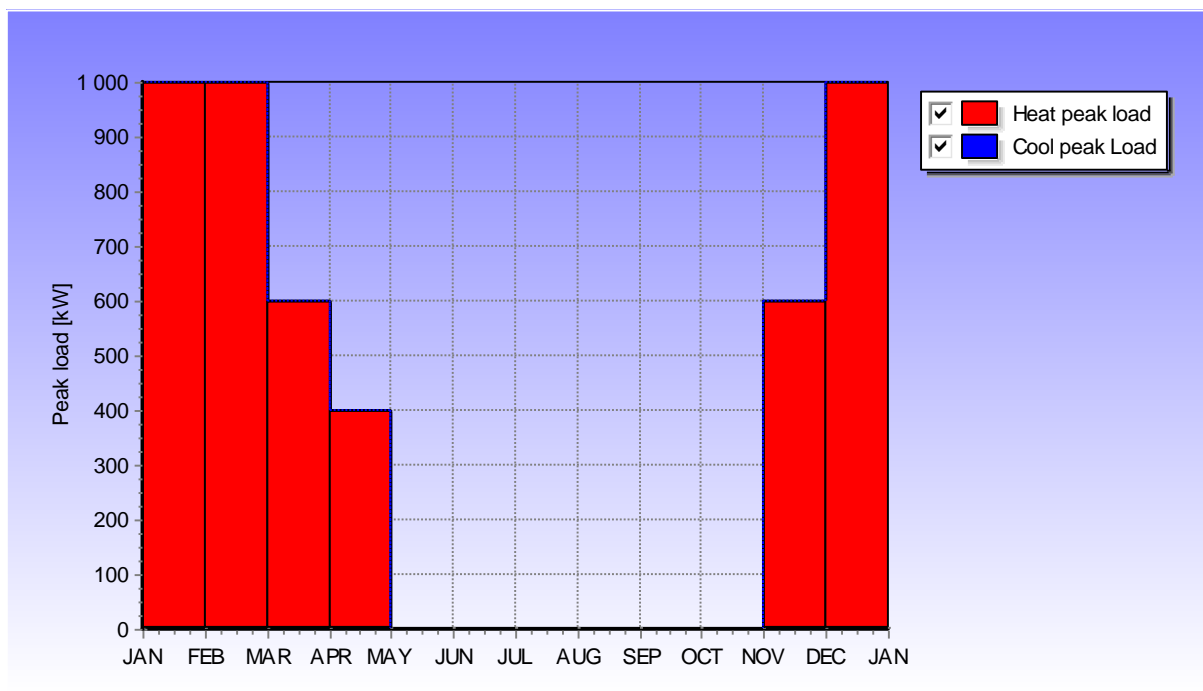
Data for grunnen	
Bergart	Dioritt
Varmeledningsevne k	3,00 W/mK
Varmekapasitet	2,9 MJ/m ³ K (fra EED)
Temperatur i grunnen	7,7° C (startverdi ved 30 m dyp)
Geotermisk varmestrøm	0,05 W/m ²
Borehullet	
Konfigurasjon	
Avstand borehull	5-30m
Kollektor	Enkel U
Borehulldiameter	114 mm (4 ½")
Kollektortype	PE DN40PN6 d=40mm, t =2,3mm
Effektiv borehullsmotstand	Calculated value R = 0,12 m·K/W
Kollektorvæske	25 % Etanol frysetemperatur-14 °C
Minimumstemp. kollektorvæske	+1,0 °C
Maksimumstemp. kollektorvæske	30 °C
Sirkulasjonshastighet kollektorvæske	0,65 l/s
Varmeuttak	
Varmeuttak	978 MWh, 733,5 grunnen + 244,5 VP Figur 15
SPF	Heating 4,0
Spiss last	Se Figur 16
Varmt vann (DHW)	2039 MWh 1456,4 MWh + 582, 6 VP Figur 14
SPF (*DHW)	3,5



Figur 14. Varmebehov for boenhetene i Zero Village Bergen (ikke næringsbygg og offentlige bygg. Data fra Sintef



Figur 15. Månedlig fordeling av energi. Inputdata for EED simuleringene.



Figur 16. Spisslast pr måned. Inputdata for EED simuleringene.

5.2 Case «Standard»

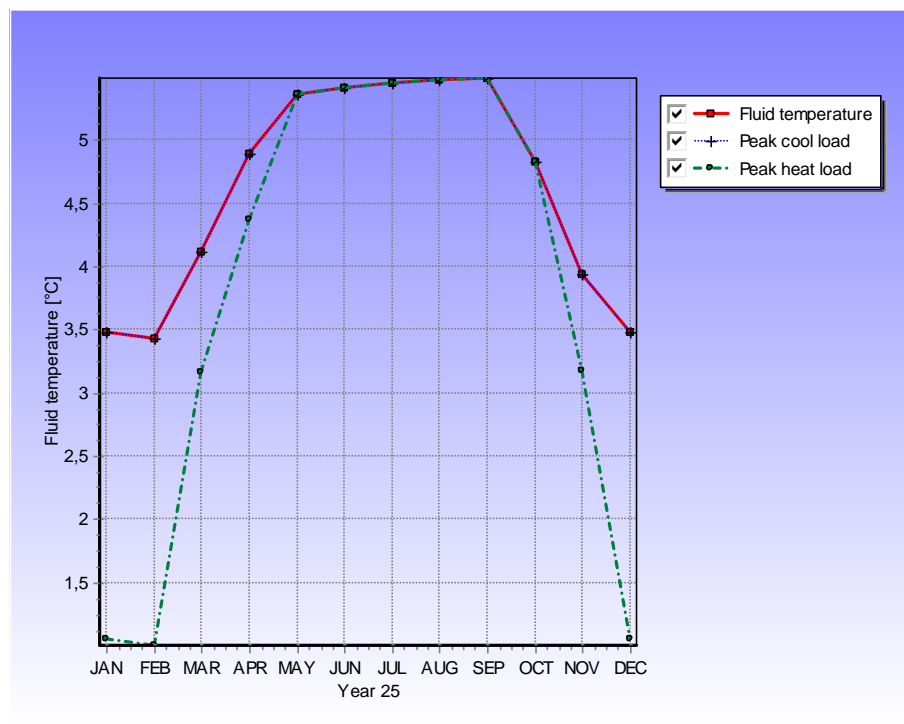
«Case Standard» er definert med utgangspunkt i de foreslåtte data for det totale energibehov og effektlast for alle planlagte boenheter i Zero Village Bergen som beskrevet i seksjon 5.1. Brønnene planlegges kun for varmeuttak og uten noen form for lading av brønner på sommeren. Det er ikke antatt noen effekt av grunnvannsstrømning.

I Tabell 4 er det vist tre ulike optimaliserte løsninger for maksimum borehullsavstand på henholdsvis 25 meter, 15 meter og 10 meter. Det rimeligste men mest plasskrevende alternativet er med 136 brønner til 250 m dybde og med 25m borehullavstand. En slik brønnpark krever et stort areal. Temperaturutvikling over 25 år og i det 25 året for en brønnpark med 136 brønner til 250 m dybde i et 8 x17 konfigurasjon og med 25 m avstand er vist i Figur 17 og Figur .

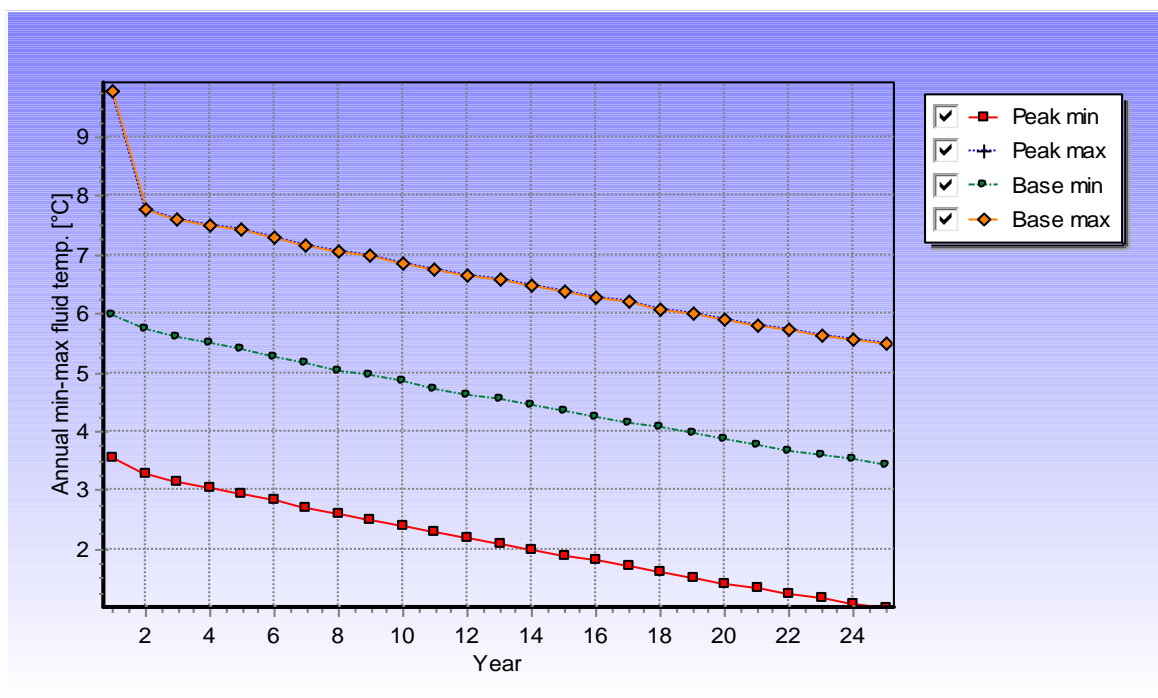
Det er også mulig å etablere en brønnpark med 300 brønner og med brønnavstand 10 m. Et slikt alternativ vil kreve betydelig flere boremetre totalt.

Tabell 4. Simuleringsdata fra EED. Ulike brønnpark-design som vil oppfylle oppvarmingsbehovene definert for «Case Standard».

No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m ²]	Length [m]	Width [m]
136	8 x 17 rectangle	25	250	34000	70000	400	175
192	6 x 32 rectangle	15	247	47519	34875	465	75
300	6 x 50 rectangle	10	222	66516	24500	490	50



Figur 17 Temperaturutvikling over et år i det 25. året for Case «Standard» med 136 brønner til 250 m dybde og med 25m borehullavstand.



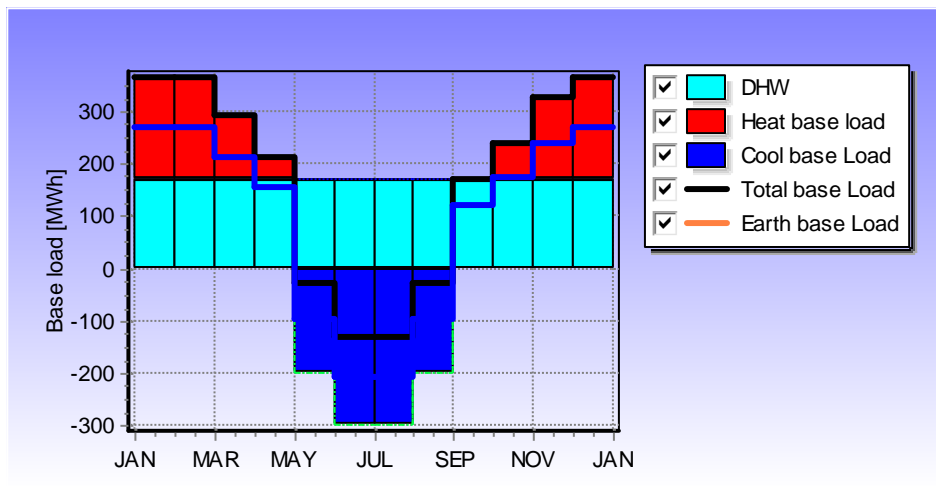
Figur 18. Temperaturutvikling over 25 år for Case «Standard» med 136 brønner til 250 m dybde og med 25m borehullavstand.

5.3 Case Energilagring

Lading av energibrønnene med varmt vann sommerstid gjøre at brønnparken har høyere temperatur når fyringssesongen starter om senhøsten. Det vil redusere behovet for totalt antall boremeter enten ved færre eller grunnere brønner. Det varme vannet kan tilføres fra bygningene ved aktiv eller passiv kjøling eller ved lading av brønnene med tilgjengelig lavtemperatur varme fra området som solenergi fra solfangere, varmt sjøvann, spillvarme fra fjernvarmenettet.

I simulering: Case Energilagring er det antatt lading av brønnparken i 4 måneder fra mai til august. Det er simulert kjøling ved frikjøling tilsvarende 1000 MWh/år fordelt med 200 MWh i mai og august og 300 MWh i juni og juli. Dette er vist i Figur 19 hvor ladingen er vist i blått og oppvarmingsbehov er vist med røde søyler fordelt månedlig over året.

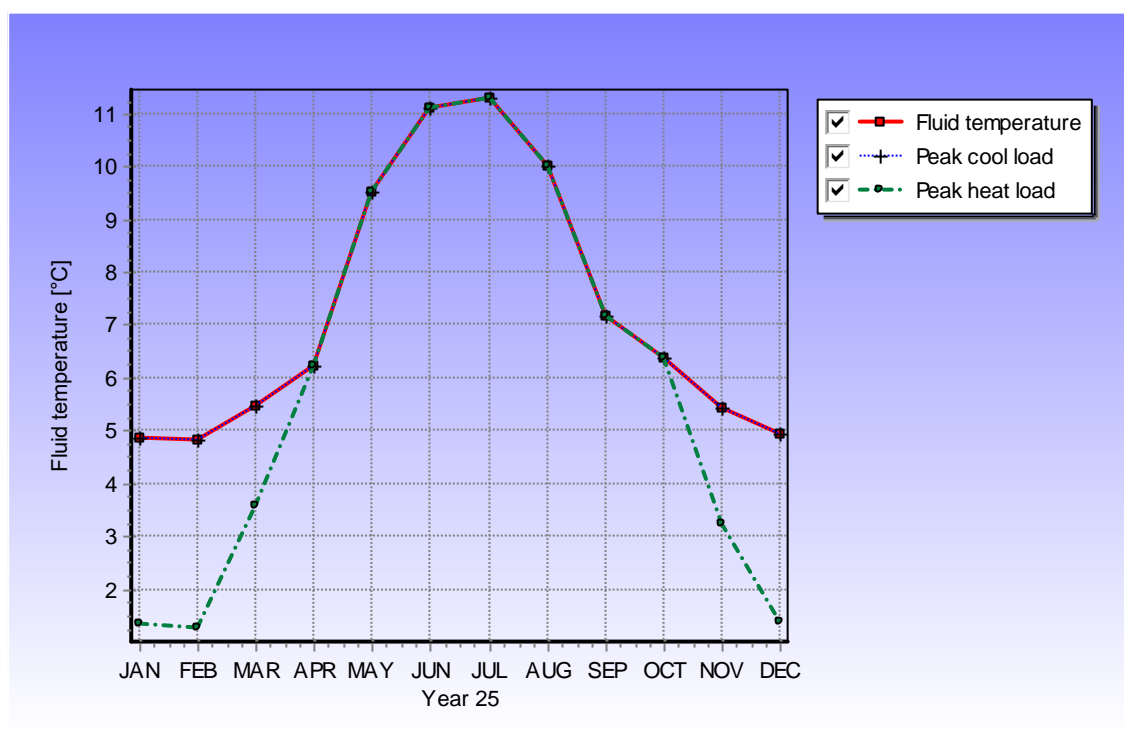
En optimalisering med tanke på antall brønner og brønndybde på samme måte som for «Case Standard» gir en stor forbedring med 10 m brønnavstand, med en simulert reduksjon i antall boremeter på mer enn 20 000 m fra simulert 66516 m til 46372 m. Reduksjonen i antall boremeter er kun 213 m med 25 m brønnavstand (fra 34000 m til 22787 m) (Tabell 5).



Figur 19. Månedlig fordeling av energi for tilfellet der energibrønner lades om sommeren (Case Energilagring). Inputdata for EED simuleringene.

Tabell 5. Simuleringsdata fra EED. Ulike brønnpark-design som vil oppfylle oppvarmingsbehovene definert for Case Energilagring.

No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m ²]	Length [m]	Width [m]
135	9 x 15 rectangle	25	250	33787	70000	350	200
160	5 x 32 rectangle	15	248	39735	26100	465	60
200	4 x 50 rectangle	10	232	46372	14700	490	30



Figur 20 Temperaturen i brønnparken over året i år 25. Temperaturen øker fra ca 5 til 11 C om sommeren ved ved å dumpe varme i brønnene gjennom. Konfigurasjon 9x15 brønner a 250 m med 25 m avstand

5.4 Case Grunnvannsbidrag

Grunnvannsstrømning gjør at man får tilført mer varme fra omkringliggende berggrunn via grunnvann som strømmer i sprekker i fjellet. Dette vil føre til en reduksjon i behovet til antall brønner i brønnparken. EED tar i utgangspunktet ikke hensyn til grunnvannsbidrag i simuleringene, men ved å øke varmeledningsevnen kan man få simulert en forenklet stasjonær effekt som antas å kunne representere grunnvannsbidraget, som sannsynligvis vil er ikke-stasjonært

I simuleringene i «Case Grunnvannsbidrag» er det antatt at en liten/moderat grunnvannsstrømning i brønnene vil tilsvare en økning av varmeledningsevnen fra 3,0 til 3,5 W/mK. Det er ikke vurdert nøyaktig hvor stort grunnvannsbidrag dette vil representere i praksis da det vil avhenge av blant annet på hvilket dyb sprekken skjærer brønnen og ved hvilken temperatur grunnvannet har relatert til temperaturen i brønnen. Antall sprekker som skjærer brønnen vil også ha betydning på hvordan grunnvannsstrømningen påvirker egensirkulasjonen i brønnen.

Simuleringene i EED viser at en slik grunnvannsstrømning vil føre til at antall brønner kan reduseres fra 135 til 133 brønner for case «Standard» (se Tabell 6). Endring av varmeledningsevnen ser her ut til å ha relativt liten effekt på antall brønner. Det bør undersøkes videre om metoden med endring av varmeledningsevnen er representativ for økt grunnvannsstrømning, og hvor stor økt grunnvannsstrømning de valgte verdiene representerer.

Ved å legge inn både lading av brønner og grunnvannsbidrag i simuleringene kan antall brønner reduseres til 133 brønner med 246 m dybde og med 25 m brønnavstand (Tabell 7).

Tabell 6. Simuleringsdata fra EED. Ulike brønnpark-design som vil oppfylle oppvarmingsbehovene med Case «Standard» pluss grunnvannsbidrag inkludert

No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m ²]	Length [m]	Width [m]
133	7 x 19 rectangle	25	247	32915	67500	450	150
186	6 x 31 rectangle	15	248	46116	33750	3450	75
245	5 x 49 rectangle	10	244	61040	19600	490	40

Tabell 7. Simuleringsdata fra EED. Ulike brønnpark-design som vil oppfylle oppvarmingsbehovene med Case «Standard» pluss grunnvannsbidrag og energilagring inkludert

No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m ²]	Length [m]	Width [m]
133	7 x 19 rectangle	25	246	32702	67500	450	150
150	5 x 31 rectangle	15	248	38474	26100	450	60
250	4 x 50 rectangle	10	225	45028	14700	490	30

5.5 Case Effektlast

Det siste tilfellet som er vurdert er å redusere effektoppene, det vil si å designe systemet slik at det ikke brønnparken trenger å være dimensjonert for de dagene der effektbehovet er aller størst. Det betyr at man må finne andre metoder for å ta toppene disse dagene. I dette arbeidet er det ikke vurdert hvordan effektoppene skal tas – denne simuleringen er tatt med for å vise at alternative metoder for å ta effektoppene bør vurderes.

For Case effektlast er topplastene på oppvarming halvert. For de tre kaldeste månedene er spisslast redusert fra 1000 kW til 500 kW. Simuleringsresultater fra EED med halvert topplast er vist i Tabell 8. Her ser man at brønnparken kan reduseres fra 133 brønner til 100 brønner på 244 meters dybde med 25 m brønnavstand. Hvis man kombinerer dette med lading av brønnene og inkluderer varmebidrag fra grunnvannsstrømning (det vil si summen av Case Energilagring, Case Grunnvannsbidrag og Case Effektlast), kan man gå helt ned til 80 borehull med 25 meters avstand eller alternativt 100 borehull med 10 meters avstand (se Tabell 9). Da har man fått en betydelig innsparing i forhold til antall boremeter samt arealbehov i forhold til Case «Standard».

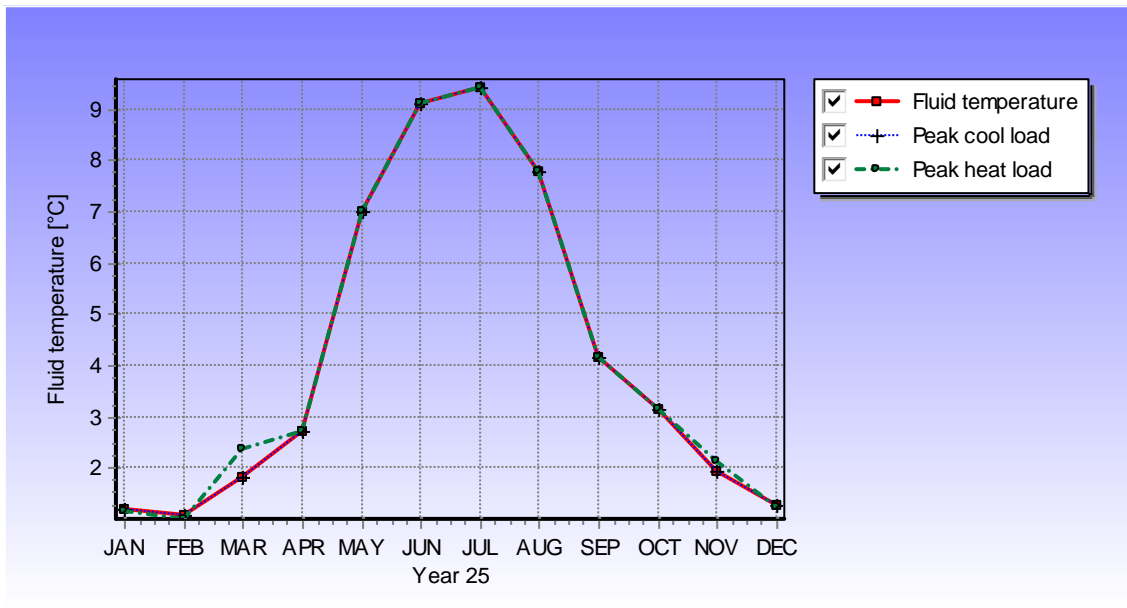
I Figur - Figur er temperaturutvikling for brønnparken per år og for det 25. året for «Case Effektlast pluss varmebidrag fra grunnvannsstrømning og lading av brønnene vist. Figurene viser at lading av brønnene fører til en langt mer positiv temperaturutvikling over tid. Dette vil også føre til en bedre effektivitet for brønnene.

Tabell 8. Simuleringsdata fra EED. Ulike brønnpark-design som vil oppfylle oppvarmingsbehovene definert for Case Redusert Effektlast.

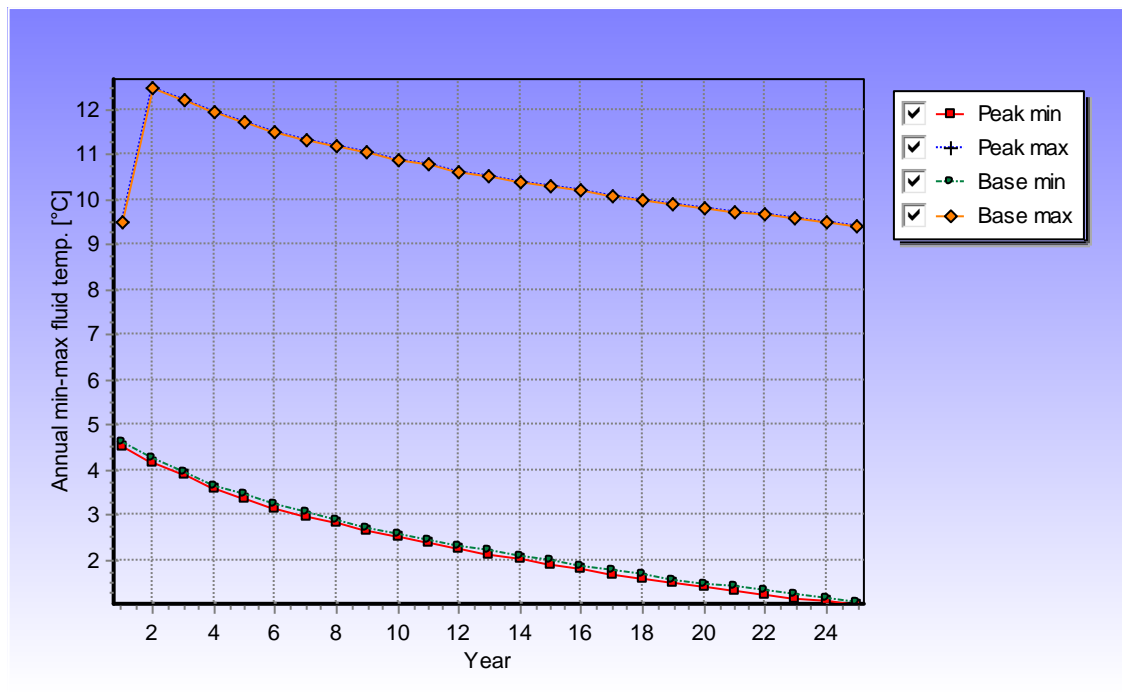
No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m ²]	Length [m]	Width [m]
100	5 x 20 rectangle	25	244	24427	47500	475	100
140	4 x 35 rectangle	15	249	34930	22950	510	45
200	4 x 50 rectangle	10	247	49416	14700	490	30

Tabell 9. Simuleringsdata fra EED. Ulike brønnpark-design som vil oppfylle oppvarmingsbehovene definert for Case Effektlast pluss varmebidrag fra grunnvannsstrømning og lading av brønnene.

No bh	Type	Spacing [m]	Depth [m]	Total length [m]	Land area [m ²]	Length [m]	Width [m]
76	4 x 19 rectangle	25	245	18614	33750	450	75
90	3 x 30 rectangle	15	250	22528	13050	435	30
98	2 x 49 rectangle	10	250	24513	4900	480	10

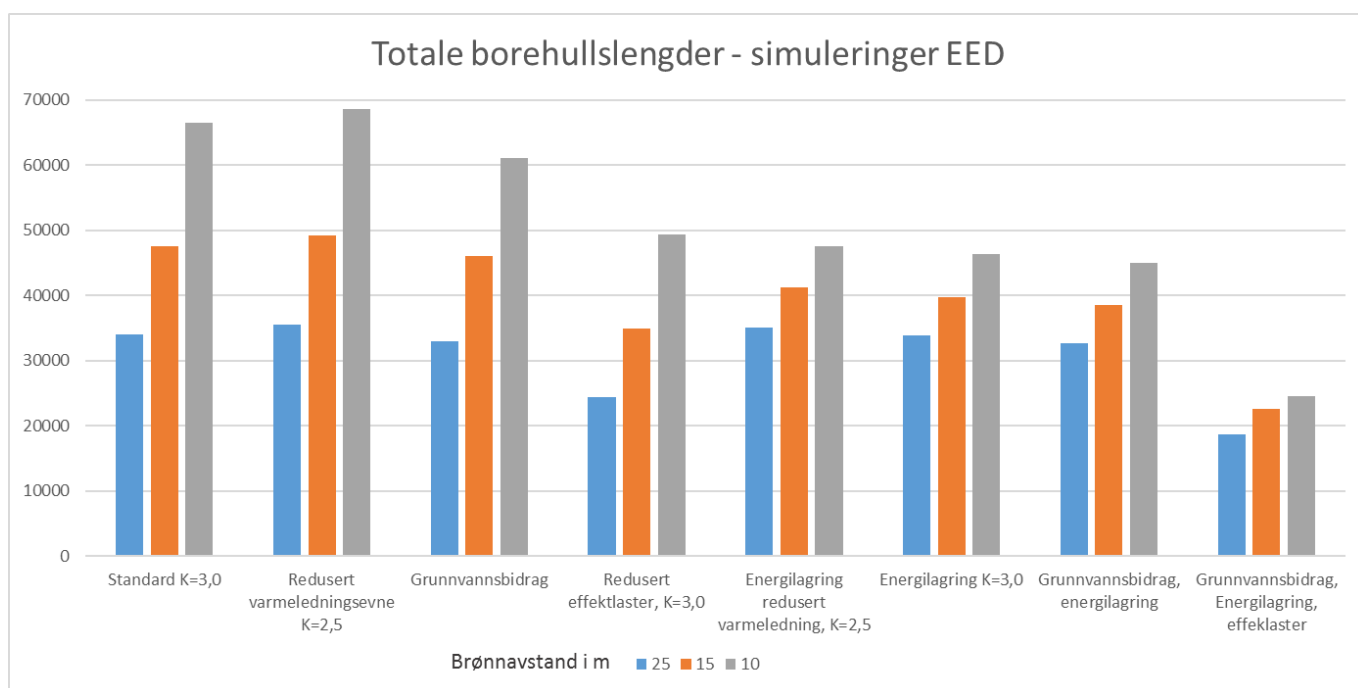


Figur 21. Temperaturutvikling over et år i det 25. året for Case «Effektlast» pluss varmebidrag fra grunnvannsstrømning og lading av brønnene. Dette tilfellet gir 98 brønner på 250 m dybde og har 10m borehullavstand.



Figur 22. Temperaturutvikling over 25 år for Case «Effekttopper» pluss varmebidrag fra grunnvannsstrømning og lading av brønnene. Dette tilfellet gir 98 brønner på 250 m dybde og har 19m borehullavstand.

5.6 Oppsummering av simuleringer



Figur 23 Total brønnlengde av brønnparken simulert med EED med brønnavstand 25 m (blå søyle), 15 m (oransje søyle) og 10 m (grå søyle)

Total brønnlengde for en anbefalt brønnpark simulert med EED er vist i Figur 23. Total brønnlengde for de forskjellige casene EED simuleringene viser at det er de høye spisslastene for oppvarming som er dimensjonerende for størrelsen på brønnparken. Det er viktig å finne løsninger for å redusere disse. Samtidig må det arbeides videre med å undersøke effekten på grunnvannsbidraget – det er ikke klart hvor representativ simuleringene som er foretatt er på et tilfelle med betydelig grunnvannsstrømning.

6 Sammendrag og konklusjoner

Energilagring vil være en sentral komponent i framtidens energisystem. Fordelen med et geotermisk energilag er at termisk energi kan benyttes når det er behov, uavhengig av vær eller når den produseres. Slike energilag har et stort potensial når det gjelder utnyttelse av lokale termiske energikilder, det kan være energi fra sol, sjø, berggrunn eller grunnvann samt spillvarme fra lokal industri, bygninger og infrastruktur, altså energi som normalt sett ikke ville blitt utnyttet. Tatt i betraktning at vi bruker 2/3 av vår stasjonære elektriske energiproduksjon til oppvarming kan dette utgjøre store besparelser og vil være en viktig del i løsningen av framtidens energiutfordringer.

I dette prosjektet har vi sett nærmere på hvordan geotermiske energilag kan brukes i utbyggingen av nullutslippsboliger med spesiell fokus på Zero Village Bergen, Norges største nullutslippsprosjekt for boliger. Det har vært et mål å kartlegge og utføre flere fysiske målinger av de geologiske forholdene i det planlagte utbyggingsområdet spesielt med tanke på temperatur, grunnvann og termisk ledningsevne og ved hjelp av disse dataene har vi utført numeriske simuleringer for å best mulig finne ut hvordan et lager bør designes i typisk vestnorsk berggrunn. Videre har vi gjennom et detaljert litteraturstudie undersøkt hvordan tidligere lagringsprosjekter og konsepter har fungert andre steder i Norge og verden. Mye av utfordringen ved å lagre varme i undergrunnen ligger i at systemet er langsomt. Lagring eller lading av en borehulllager foregår tradisjonelt ved at varme fra overflatekilder pumpes ned gjennom et lukket system av kollektorslanger hvor varmen overføres fra kollektorslange til grunnvann eller direkte til grunnfjellet. Hvordan varmen lagres i berggrunnen avhenger av berggrunnens varmeledningsevne og om det er grunnvann tilstede. Grunnvann har en positiv effekt ved at det virker som et overføringsmedie for varme fra borehullet til fjellet. I tillegg kan grunnvannet «flytte» varmen til større områder, eller man kan få transportert inn varmere grunnvann til borehullet.

Resultater fra forprosjektet viser at Ådlandsområdet består i hovedsak av bergartene amfibolitt-charnokitt gneis, anorthositt, noritt og norittisk glimmergneis. Varmeledningsevner på representative bergatsprøver fra området viser lave varmeledningsevner. Det antas basert på brønnrapporter fra brønner i området og geologiske undersøkelser at grunnvannstrømmen også er lav, grunnet i hovedsak liten oppsprekking og lav topografi. Design av en brønnpark må ta hensyn til disse forholdene.

Det ble installert fiberkabel i to energibrønner på Mjåtveitflaten for å teste bruken av fiberoptiske temperaturmålinger. Temperaturmålinger av antatt in-situ tilstand i brønnene målt like etter at fiberen var montert viste at temperaturen i brønnene var forskjellig. Temperaturen i brønn B antas å være påvirket av innstrømmende grunnvann i sonen 85 – 120 m. Det antas en temperaturgradienten på ca 10 K/1000 , noe som er lavere enn gjennomsnittet av det som er målt i dype borehull i Norge (ref. NGU)

Simuleringer med EED viser at det kreves en stor og arealkrevende brønnpark for å dekke alt oppvarmingsbehovet, både varmt vann og bygninger for den planlagte utbyggingen av Zero Village Bergen på Ådland. Ved å utnytte parken som

- energilagring ved aktiv kjøling eller passiv lading av brønnene
- utnytte grunnvannsstrømning i området aktivt
- minimalisere og begrense effektlastene

kan antall boremeter reduseres til 37 % (fra 66516 m til 24513m)og areal av brønnpark til 20 % av det opprinnelige (fra 24500m² til 4900 m²).

Bruk av bergvarme kan være et god løsning for den planlagte Zero Village Bergen utbyggingen på Ådland. Ved design og etablering av en slik brønnpark er det viktig at man utreder alternativer og velger en kostnadseffektiv og god løsning som er optimalt designet for det planlagte energibehov.

7 Referanser

1. **Fornybar.no.** Geotermisk energi. *Fornybar.no.* [Internett] 2015. <http://www.fornybar.no/nyeteknologier/geotermisk-energi>.
2. *Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe.* **Sanner, B., et al.** 1, London : RELX Group, 2003, Geothermics, Vol. 32, ss. 579-588.
3. *Thermal energy storage—A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1—Seasonal storage in the ground.* **Pavlov, G.K. og Olesen, B.W.** 3, s.l. : Taylor&Francis, 2012, HVAC&R Research, Vol. 18, ss. 515-538.
4. *Borehole Heat Storage for the Anneberg Solar Heated Residential District Danderyd, Sweden.* **Dalenbäck, J.O., et al.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 201-206.
5. *Parametric study of a single-well seasonal ATES.* **Dupasquier, S. og Parriaux, A.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 99-104.
6. *Optimization of well field configurations for Aquifer Thermal Energy Storage.* **van Elswijk, R.C., et al.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 105-110.
7. *Lessons from 100 ATES projects - The development of aquifer storage in the Netherlands.* **Snijders, A.L.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 147-152.
8. **Réveillère, A., et al.** Geothermal contribution to the energy mix of a heating network when using Aquifer Thermal Energy Storage: Modeling and application to the Paris basin. *Geothermics.* 2013, ss. 60-79.
9. *Operating Strategies for ATES in Areas with Non-ideal Climates.* **Allen, D.M., et al.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 93-98.
10. **Eggen, G. og Vangsnes, G.** *Heat pump for district cooling and heating at Oslo airport, Gardermoen.* 2004.
11. **Anderson, O.** *The ATES Project at Stockholm Arlanda Airport - Technical Design and Environmental Assessment.* Malmö, Sweden : s.n., 2009.
12. **B., Dagestad A. and Heidenstrøm.** *Kartlegging av potensialet for grunnvarmeuttak fra løsmasser i Voss.* Trondheim : NGU Rapport 2000.109, Norges Geologiske Undersøkelse , 2000.
13. **Luster kommune.** *Lokal energiutredning , Luster kommune.* 2007.
14. **Banks, D.** *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling.* s.l. : Wiley-Blackwell, 2012.
15. **Bayer, D., Heidemann, W. og Müller-Steinhagen, H.** *Modeling and Simulation of Groundwater Influence on Borehole Thermal Energy Stores.* Stuttgart, Germany : s.n., 2009.
16. *Analytical Studies of the Influence of Regional Groundwater Flow on the Performance of Borehole Heat Exchanges.* **Claesson, J. og Hellström, G.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 195-200.
17. **Zanchini, E., Lazzari, S. og Priarone, A.** Long-term performance of large borehole heat exchanger fields with unbalanced seasonal loads and groundwater flow. *Energy.* 2012, ss. 66-77.
18. **Hecht-Méndez, J., et al.** Optimization of energy extraction for vertical closed-loop geothermal systems considering groundwater flow. *Energy Conversion and Management.* 2013, ss. 1-10.
19. **Liuzzo-Scorpo, A., Nordell, B. og Gehlin, S.** Influence of regional groundwater flow on ground temperature around heat extraction boreholes. *Geothermics.* 2015, ss. 119-127.
20. **Slagstad, S., et al.** *Factors influencing shallow (< 1000 m depth) temperatures and their significance for extraction of ground-source heat.* 2009.
21. **Brandl, H.** Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56. 2005, Vol. 2, ss. 81-122.
22. **Spitler, J.D. og Gehlin, S.** Thermal responses testing for ground source heat pump systems - an historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2015, ss. 1125-1137.
23. **Morland, G.** *Petrology, Lithology, Bedrock Structures, Glaciation and Sea Level. Important Factors for Groundwater Yield Composition of Norwegian Bedrock Boreholes?* Trondheim : NGU rapport 97.122, Norges Geologiske Undersøkelse, 1997.
24. **Morland, G., et al.** *Grunnvannskvalitet i borebrønner i fjell fra områder nær Oslo og Bergen.* Trondheim : NGU rapport 95.161 Norges Geologiske Undersøkelse, 1995.
25. **Midttømme, K. og Roaldset, E.** *Thermal conductivity of sedimentary rocks; uncertainties in measurement and modelling.* 1999.
26. *Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages.* **Mogensen, P.** 1983, Swedish Council for Building Research, Vol. 16, ss. 652-657.
27. *Thermal Response Test - Experiences in Germany.* **Sanner, B., et al.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 177-182.

28. *A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems.* **Zhang, C, et al.** 2014, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 40, ss. 851-867.
29. *Groundwater Influence on Thermal Response Test.* **Gehlin, S.** Warsaw : s.n., 2003. Futurestock 2003. ss. 373-379.
30. *A new, small, wireless instrument to determine ground thermal conductivity in-situ for borehole heat exchanger design.* **Rohner, E, Rybach, L og Charli, U.** Antalya, Turkey : s.n., 2005. World Geothermal Congress. s. 4.
31. *New measurement techniques for geothermal heat pump - borehole heat exchanger quality control.* **Rohner, E, et al.** Zürich, Switzerland : s.n., 2008. Ninth International IEA heat pump conference.
32. *New minituarized wireless instrument to characterize thermal properties of borehole heat exchangers.* **Martos, J, et al.** Stockholm, Sweden : s.n., 2009. International conference on thermal energy storage, Effstock 2009.
33. *An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers.* **Fujii, H, et al.** 2009, Geothermics, ss. 399-406.
34. *Interpretation of thermal response tests using the fiber optic distributed temperature sensing method.* **Shim, BO og Song, Y.** 2009. Effstock.
35. **Liebel, H.T.** Influence of Groundwater on Measurements of Thermal Properties in Fractured Aquifers. *Doctoral theses at NTNU, 2012:113.* s.l., Norway : NTNU, 2012.
36. *Geothermal response tests using controlled multipower level heating and cooling pulses: quantifying groundwater effects on heat transport around a borehole heat exchanger.* **Witte, H og Van Gelder, A.** 2006. 10th international conference on thermal energy storage (Ecstock).
37. *New analytical solution for sizing vertical borehole ground heat exchangers in environments with significant groundwater flow: parameter estimation from thermal response test data.* **Chiasson, A og O'Connell, A.** 2011, HVAC&R Research, Vol. 17, ss. 1000-1011.
38. **Wagner, V., et al.** Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers. *Geothermics.* 2013, ss. 22-31.
39. *Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model.* **Raymond, J, et al.** 2011, Renewable Energy, Vol. 36, ss. 315-324.
40. **Midttømme, K, et al.** Ground-Source Heat Pumps and Underground Thermal Energy Storage - Energy for the future. [red.] T Slagstad. *Geology for Society, Geological Survey of Norway Special Edition.* 2008, Vol. 11, ss. 93-98.
41. *Energy and exergy analysis of ground thermal energy storage: optimal charging time in different operating conditions.* **Cosentino, S, et al.** 2015. ECOS 2015 - CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS.
42. **Topdal, Anita.** *Analyse av varmepumpesystem tilknyttet termisk energilager i fjell for oppvarming og kjøling av bygninger.* Trondheim : The Norwegian University of Science and Technology, EPT-P-2005-45-B, 2005.
43. **Statsbygg AS.** *Hypermoderne Energianlegg på Høgskolen i Bergen.* 2015. Fakta-ark.
44. <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/93221/ESL-HH-10-08-08.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. **Hellström, G, et al.** Sapporo, Japan : s.n., 1997. Megastock.
45. *A Review of Ground Coupled Heat Pump Models Used in Whole-Building Computer Simulation Program.* **Do, SL og Haberl, JS.** 2010. H&H - Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates.
46. *Geothermal heat pump in heating mode: Modeling and simulation on TRNSYS.* **Chargui, A., Sammouda, H. og Farhat, A.** 2012, International Journal of Refrigeration 35, ss. 1824-1832.
47. **EQUA Simulation.** IDA Indoor Climate and Energy. *EQUA.* [Internett] 2015. <http://www.equa.se/en/ida-ice>.
48. *Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems.* **Yang, H, Cui, P og Fang, Z.** 2010, Applied Energy, Vol. 87, ss. 16-27.
49. *Solar District Heating with Seasonal Storage in Attenkirchen.* **Reuss, M. og Mueller, J.P.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 221-226.
50. *Drilling in hard rock and borehole heat exchangers for seasonal stores.* **Lundin, S.E., Eriksson, B. og Brinck, B.** Warsaw : s.n., 2003. Futurestock 2003. ss. 399-404.
51. *Combination of Solar Heat and Ground Source Heat Pump for Small Buildings.* **Kjellson, E., et al.** Warsaw : s.n., 2003. Futurestock 2003. ss. 467-472.
52. **Eicker, U.** *Energy Efficient Buildings with Solar and Geothermal Resources.* s.l. : John Wiles & Sons, Ltd., 2014. s. 605.
53. **Kjellson, E.** *Solar Collectors Combined with Ground-Source Heat Pumps in Dwellings - Analysis of System Performance, PhD Thesis.* Lund, Sweden : Lunds University, 2009.
54. **Wolleng, Terje.** *VVS-tekniske klimadata for Norge.* Oslo : Byggforskningen, 1978. Vol. 33.

55. *Varden skole - Norges første hybride solceller/solfangere installeres i Bergen.* **Stoveland, AO.** 2015. Energidagen Bergen 2015.
56. *Efficient usage of waste heat by applying a seasonal energy storage (BTES) at ITT Water & Wastewater AB, Emmaboda, Sweden.* **Andersson, O, Rydell, L og Algotsson, T.** s.l. : Richard Stockton College, New Jersey, 2009. EffStock Conference 2009.
57. **Acuña, J. og Palm, B.** *Experimental comparison of four borehole heat exchangers.* [8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen] Stockholm, Sweden : s.n., 2008.
58. *Borehole Thermal Energy Storage Coupled to Peak Load PCM Storage for Efficient Free Cooling System.* **He, B., Martin, V., Anderson, O. og Setterwall, F.** Warsaw : s.n., 2003. Futurestock 2003. ss. 389-397.
59. **López-Sabirón, A.M., et al.** Environmental profile of latent energy storage materials applied to industrial systems. *Science of The Total Environment.* 2014, ss. 565-575.
60. **Gether, K., et al.** *Principles of saving energy with dynamic thermal storage.* 2009.
61. **Zhou, Z., et al.** Phase change materials for solar thermal energy storage in residential buildings in cold climate. *Renewable and Sustainable energy reviews.* 2015, ss. 692-703.
62. **Kensby, J., Trüschel, A. og Dalenbäck, J-O.** Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test. *Applied Energy.* 2015, ss. 773-781.
63. **Comodi, G., et al.** Multi-apartment residential microgrid with electrical and thermal storage devices: Experimental analysis and simulation of energy management strategies. *Applied Energy.* 2015, ss. 854-866.
64. **Gondre, D., Johannes, K. og Kuznik, F.** Specification requirements for inter-seasonal heat storage systems in a low energy residential house. *Energy Conversion and Management.* 2014, ss. 628-636.
65. *Case study of zero energy house design in UK.* **Wang, L, Gwilliam, J og Jones, P.** 11, 2009, Energy and Buildings, Vol. 41, ss. 1215-1222.
66. *Skarpnes Pilot Project website.* **ZEB.** 2015.
67. *Geophysical Methods for Monitoring Temperature Changes in Shallow Low Enthalpy Geothermal Systems.* **Hermans, T., et al.** 7, s.l. : MDPI, 2014, Energies, ss. 5083-5118.
68. *Fibre optic temperature measurements: a new approach to determine the dynamic behaviour of the heat exchanging medium inside a borehole heat exchanger.* **Hurtig, E., et al.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 189-194.
69. **Reinsch, T. og Hennings, J.** Temperature-dependent characterization of optical fibres for distributed temperature sensing in hot geothermal wells. *Measurement Science and Technology.* 2010.
70. **Acuna, J.** *Distributed thermal response tests - New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes.* KTH, Stockholm, Sweden : PhD. Thesis, 2013.
71. **Acuna, J.** *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers.* s.l. : KTH Energy and Environmental Technology, 2010.
72. *Is Geothermal Energy an Alternative for Svalbard?* **Midttømme, K, et al.** Celle, Germany : s.n., 2015. SES, The Third Sustainable Earth Science Conference & Exhibition, Celle Germany.
73. **Bayer, P., dePaly, M. og Beck, M.** *Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal.* Zürich, Switzerland : s.n., 2014.
74. **Beck, M., et al.** *Optimization of the Energy Extraction of a Shallow Geothermal System.* 2010.
75. **Koochi-Fayegh, S. og Rosen, M.A.** A Review of the Modelling of Thermally Interacting Multiple Boreholes. *Sustainability.* 2013.
76. —. Examination of thermal interaction of multiple vertical ground heat exchanger. *Applied Energy.* 2012, ss. 962,969.
77. **Co, C.K. og Horne, R.N.** Characterization of Geothermal Interwell Connectivity Using Thermal and Tracer Data. *GRC Transactions.* 2011, Vol. 35, ss. 1411-1416.
78. **Gentier, S., Rachez, X., et al.** Transport and Flow Modelling of the Deep Geothermal Exchanger Between Wells at Soultz-sous-Forêts (France). *GRC Transactions.* 35, 2011, ss. 363-369.
79. **Diersch, H.J.G., et al.** Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. *Computer & Geosciences.* 37, 2011, ss. 1122-1147.
80. *Medium Deep High Temperature Heat Storage.* **Homuth, S, Rühaak, W og Sass, I.** Pisa, Italy : s.n. European Geothermal Congress 2013. Vol. ISBN 978-2-8052-0226-1.
81. **Giambastiani, B.M.S., et al.** Energy performance strategies for the large scale introduction of geothermal energy in residential and industrial buildings: The GEO.POWER project. *Energy Policy.* 2014, ss. 315-322.
82. **Zheng, M., Meinrenken, C.J. og Lackner, K.S.** Smart households: Dispatch strategies and economic analysis of distributed energy storage for residential peak shaving. *Applied energy.* 2015, ss. 246-258.

83. **Gupta, R. og Irving, R.** Development and application of a domestic heat pump model for estimating CO₂ emissions reductions from domestic space heating, hot water and potential cooling demand in the future. *Energy and Buildings*. 60, 2013, ss. 60-74.
84. *Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy.* **Hähnlein, S., et al.** 59, s.l. : Elsevier, 2013, Energy Policy, ss. 914-925.
85. **NGU.** Oversikt over større grunnvarmeanlegg i Norge. *Norges Geologiske Undersøkelser*. [Internett] 2015. <https://www.ngu.no/sites/default/files/grunnvarmeanlegg.pdf>.
86. *Geothermal Energy - Country Update for Norway.* **Midttømme, K., Ramstad, R.K. og Müller, J.** Melbourne : s.n., 2015. World Geothermal Congress 2015.
87. *Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review.* **Lund, J.W. og Boyd, T.L.** Melbourne : s.n., 2015. World Geothermal Congress 2015.
88. **Midttømme, K., Hauge, A. og Grini, R.S.** *Underground thermal energy storage (UTES) with heat pumps in Norway.* 2009.
89. **Forskningsrådet.** *Energi 21, Innsatsgruppe Fornybar termisk energi, Arbeidsgruppe Geotermisk energi.* Oslo : Norges Forskningsråd, 2010.
90. *Byutvikling basert på evig grønn, lokal energi.* **Einarsen, E.** Bergen, Norway : s.n., 2015. Energidagen 2015.
91. **Bergen University College.** About Bergen University College. *Bergen University College*. [Internett] 01 07 2014. <http://www.hib.no/english/english/>.
92. **Grønnesby, Egil.** *Høgskolen i Bergen.* [art.] Egil Grønnesby, Sweco. Bergen University College, Bergen, Norway : s.n., 15 08 2014.
93. *Large scale pilot project with solar heating for a residential area - success and disaster.* **Lundh, M og Löfström, E.** 2007. ECEEE 2007 SUMMER STUDY, SAVING ENERGY – JUST DO IT. ss. 987-991.
94. *Velger solceller fremfor solfangere i nytt prestisjeprosjekt.* **Drevon, F.** 2014. Artikkel i Teknisk Ukeblad på nett.
95. **Rashed, M.** *Measurement of radon concentrations and temperature profiles in boreholes, MSc Thesis in Energy Physics.* Bergen : Dept Phys Techn, University of Bergen, 2013.
96. *New heat flow data from three boreholes near Bergen, Stavanger and Moss, southern Norway.* **Maystrenko, Y.P., et al.** s.l. : Elsevier, 2015, ss. 79-92.
97. **Henriksen, H.** *Grunnvann i Meland og Austrheim kommuner.* NGU rapport 92.141. s.l. : NGU, 1992.
98. **Fossen, H. & Ragnhildstveit, J.** *Berggrunnskart ergen 1115I, M 1:50000.* s.l. : Norges Geologiske Undersøkelse , 2002.
99. **Larsen, O., et al.** Kinematics and timing of polyphase post-Caledonian deformation in the Bergen area, SW Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*. 83, 2003, Vol. 3, ss. 149-166.
100. *Effects of fracture lineaments and in-situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, Western Norway.* **Henriksen, H. og Braathen, A.** 4, s.l. : Hydrogeology journal, 2006, Vol. 14, ss. 444-461.
101. *Models of fracture lineaments - joint swarms, fracture corridors and faults in crystalline rocks, and their genetic relations.* **Gabrielsen, R.H. og Braathen, A.** s.l. : Tectonophysics, 2014, Vol. 628, ss. 26-44.
102. **E.C., Hicks og Bungum, H.** Stress inversion of earthquake focal mechanism solutions from onshore and offshore Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*. 80, 2000, Vol. 4, ss. 235-250.
103. **Olesen, O., et al.** Aeromagnetic mapping of deep-weathered fracture zones in the Oslo Region - a new tool for improved planning of tunnels. *Norsk Geologisk Tidsskrift*. 87, 2007, Vol. 1, 2, s. 253.
104. **Mathiesen, T.** *Bruddanalyse i vestre Bergensområdet med konsekvenser for geotermisk utvinning.* s.l. : University of Bergen. s. 147 pp.
105. **Henriksen, H.** *Grunnvann i Bergen, Os og Samnanger kommuner.* s.l. : NGU rapport, 1992. s. 7.
106. *Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning.* **Popov, Y., et al.** 2, s.l. : Geothermics, 1999, Vol. 28, ss. 253-276.
107. **Sartori, I., Thorud, B., Øyen A.B., Merlet, S., Haug T., Andresen, I.** *Zero Village Bergen Aggregated loads and PV generation profiles .* s.l. : ZEB The Research Centre on Zero Emission Buildings , 2016.
108. **Midttømme, K og Elvebakk, H.** *Borehullbasert energilager ved Akershus Universitetssykehus - geologiske forundersøkelser 2002-2003.* Trondheim : NGU rapport 2003.036, Norges Geologiske Undersøkelse, 2003.
109. **Oestreich, Stian Garmann.** *Analysis of heat pump system and thermal energy storage in bedrock for.* Trondheim : The Norwegian University of Science and Technology, EPT-P-2005-54-A, 2005.
110. **Maystrenko, Y.P., Olesen, O. og Elvebakk, H.K.** Indication of deep groundwater flow through the crystalline rocks of southern Norway. *Geology*. 2015, ss. 327-330.

111. **Cannon, R. og Aminzadeh, F.** *Distributed Acoustic Sensing: State of the Art*. 2013.
112. *Simulation modeling of ground source heat pump systems for the performance analysis of residential buildings*. **Cho, S. og Mirianhosseinabadi, S.** Chambéry : s.n., 2013. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. ss. 1960-1967.
113. *Evaluation of the Borehole Heat Store at InfraCity, Sweden*. **Dalenbäck, J.O., Hellström, G. og Schroeder, K.** Stuttgart : s.n., 2000. TERRASTOCK 2000. ss. 207-212.
114. **Gupta, R. og Irving, R.** Possible effects of future domestic heat pump installations on the UK energy supply. *Energy and Buildings*. 84, 2014, ss. 94-110.
115. *Simulation of the thermal borehole resistance in groundwater filled borehole heat exchanger using CFD technique*. **Gustafsson, A-M. og Westerlund, L.** 3, 2010, International Journal of Energy and Environment, Vol. 1, ss. 399-410.
116. *Simulation of a domestic ground source heat pump system using a transient numerical borehole heat exchanger model*. **He, M., Rees, S. og Shao, L.** Glasgow : s.n., 2009. Eleventh International IBPSA Conference. ss. 607-614.
117. **Javed, S., Fahlén, P. og Claesson, J.** *Vertical ground heat exchangers: A review of heat flow models*. Göteborg, Sweden : s.n., 2011.
118. **Johannessen, K. og Farhadiroushan, M.** *Distributed Acoustic Sensing - A New Way of Listening to Your Well/Reservoir*. s.l. : SPE International, 2012.
119. **Khalajzadeha, V., Heidarinejada, G. og Srebricb, J.** Parameters optimization of a vertical ground heat exchanger based on response surface methodology. *Energy and Buildings*. 43, 2011, ss. 1288-1294.
120. **Kukkonen, I.T., et al.** Geothermal studies of the Outokumpu Deep Drill Hole, Finland: Vertical variation in heat flow and palaeoclimatic implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2011, ss. 9-25.
121. *POTENTIALS FOR COST REDUCTION FOR GEOTHERMAL WELL CONSTRUCTION IN VIEW OF VARIOUS DRILLING TECHNOLOGIES AND AUTOMATION OPPORTUNITIES*. **Randeberg, E., et al.** Stanford : s.n., 2012. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
122. **Sanner, B., Mands, E. og Sauer, M.K.** *Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany*. Giessen : s.n., 2003.
123. *New heat flow data from three boreholes near Bergen, Stavanger and Moss, southern Norway*. **Maystrenko, YP, et al.** 79-92, Geothermics, Vol. 56.
124. *Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling*. **Bayer, P, Md, Paly og Beck, M.** 31, 2014, Applied Energy, Vol. 136, ss. 445-453.

Appendix A Forkortelser

Forkortelse Engelsk

ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BHE	Borehole Heat Exchanger
BTES	Borehole Thermal Energy Storage
EGS	Enhanced Geothermal System
GHP	Geothermal Heat Pump
GWHP	Ground Water Heat Pump
HDR	Hot Dry Rock
LDR	Liquid Dominated Reservoir
NGU	Geological Survey of Norway
PCM	Phase Change Material
TRT	Thermal Response Test
UTES	Underground Thermal Energy Storage

Norsk

Varmelagring i grunnvannsakviferer
Borehull varmeveksler
Varmelagring i borehull
Geotermisk system etablert uten bruk av naturlig grunnvannsstrømning
Geotermisk varmepumpe
Grunnvanns varmepumpe
Tørr varm berggrunn
Væskedominert reservoar
Norges Geologiske Undersøkelse
Faseskift materiale
Termisk responstest
Varmelagring i grunnen