



RAPPORT

Bærekraftig Energi fra løsmAsser

PILOTPROSJEKTET PÅ SAKSVIK

DOK.NR. 20210083-01-R

REV.NR. 0 / 2023-07-31

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekt

Prosjekttittel: Bærekraftig Energi fra løsmAsseR
Dokumenttittel: Pilotprosjektet på Saksvik
Dokumentnr.: 20210083-01-R
Dato: 2023-07-31
Rev.nr. / Rev.dato: 0

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Regionalt Forskningsfond Trøndelag
Kontaktperson: Linda M. Bye
Kontraktreferanse: 321116

for NGI

Prosjektleder: Sondre Gjengedal (NGI)
Utarbeidet av: Sondre Gjengedal (NGI)
Kontrollert av: Priscilla Paniagua (NGI), Jon Endre Flåtten (Fundamentering AS), Wilhelm Huus-Hansen (Noranergy AS), Tom-Andre Havnes (Malvik Kommune), Jakob Aarekol (Winns AS), Martand Singh (NTNU)

Sammendrag

Denne rapporten er en del av forskningsprosjektet *Bærekraftig Energi fra løsmasse* (BEAR) finansiert av Regionalt Forskningsfond Trøndelag via Regionalt hovedprosjekt, prosjektnummer 321116. BEAR er en pilotstudie som undersøker ulike designløsninger for grunnvarmesystemer som bruker løsmasser som en bærekraftig og stabil energikilde og som energilager. Løsningene i denne studien skiller seg fra konvensjonelle grunnvarmeløsninger ved å fungere som en integrert del av fundamentet til bygningskonstruksjoner, med bruk av såkalte "energipeler". Hypotesen er at ved å benytte integrerte grunnvarmeløsninger, slik som energipeler, bidrar dette til å redusere investerings-kostnadene ved å etablere grunnvarmesystemer i bygg som står på tykke løsmasser i Norge. Prosjektet eies av Malvik Kommune og NGI sitter som prosjektleder i prosjektet. BEAR gjennomføres i samarbeid med Winns AS, Fundamentering AS, Noranergy AS og NTNU. BEAR er delt i fire arbeidspakker (AP) hvor denne rapporten omfatter beskrivelse av arbeider og resultater fra arbeidspakke 2 (AP2 – pilotprosjekt).

I BEAR prosjektet er det testet ut et nytt konsept for energipel som tar utgangspunkt i at pelen skal fungere som et sesongvarmelager for et bygg. Valg av peletype er gjort med hensikt om å oppnå best mulig termisk effektpådrag over korte tidsperioder. Dette vil si at pelen skal være både en "effekt-pel" og en "energi-pel" som i størst mulig grad skal kunne dekke opp små effekttopper i et byggs varme- og kjølebehov. Prinsippet i BEAR-pelene er at pelene utformes som en vanntank, hvor hver pel skal romme så mye vann som mulig. For pilottesten er det valgt å teste to ulike størrelser og lengder av borede stålrørs-peler (BSR-peler), samt å se på forskjeller mellom friksjonspel og spissbærende pel. Pelene ble boret med ca. 1 meter innbyrdes avstand. Den lille friksjonspelen er 20 meter dyp og har Ø139 mm diameter og står i løsmasse, mens den store spissbærende pelen er 26,5 meter dyp og har Ø323 mm diameter og står til berg. TRT-forsøk på BEAR-pelene viser at:

- BSR-peler designet som en vannfylt tank vil ha vesentlig bedre energioverføringsrater enn konvensjonelle energipeler som benytter integrerte kollektor-rør som varmevekslere.
- Energioverføringsraten ved like strømnings-betingelser er ca. 4,5 ganger større for den store BEAR-pelen enn overføringsraten til den lille pelen, noe som i all hovedsak sammenfaller med pelenes ulikheter i diameter- og lengde-forhold.
- Den skalerte effektkurven fra TRT-testene (se Figur 6-13 og Tabell 6-1) viser at pelenes funksjon som varmeveksler med løsmasser i all hovedsak er styrt av pelenes totale overflateareal som står i kontakt med løsmassene. Indre diameter (ID) på pelen og pelens lengde (L) er avgjørende designparametere for effekt-dekningen og energidekningen til pelen.

Som følge av installasjonsutfordringer ble ikke den store pelen vanntett og kunne ikke trykkesettes og tilføres ønsket mengde varme. Ved videre testing bør pelene tettes med en tynn gummimembran for å sikre at pelene er vanntette. Dette vil også kunne bidra til å forhindre innvendig korrosjon på stålrørene. Når pelene er tett vil TRT-forsøkene kunne gjennomføres på nytt ved høyere temperaturer og bidra til å teste pelenes mekaniske ekspansjonsreaksjoner.

Innhold

1	Innledning	6
2	Områdebeskrivelse	7
2.1	Grunnundersøkelser	9
3	Energipeler - design aspekter	13
3.1	Peler som energikilde og energilager	13
3.2	Mekanisk design – de vanligste peleutføringene i Norge	14
3.3	Termisk design – "State of the art" - Energipeler	17
3.4	Temperaturens påvirkning på peler	21
4	Pilotpeler i BEAR	22
4.1	Installasjon og gjennomføring (sammenstilte protokoller)	24
4.2	Problemer med artesisk trykk og med installasjonen	27
4.3	Instrumentering, isolering og overvåkning	30
5	Termisk respons tester (TRT)	32
5.1	Konvensjonell TRT	32
5.2	Forenklet TRT	33
6	Resultater	34
6.1	Termiske responser	36
6.2	Effekt (kW) og energi (kWh) fra pelene	41
6.3	Sammenligning mot energipeler med U-kollektorer	46
6.4	Konklusjoner om BSR-pelens varmeoverføringspotensial	46
7	Forslag til videre arbeid	46
8	Referanser	47

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Forskningsprosjektet *Bærekraftig Energi fra løsmAsser* (BEAR) har som hovedmål å teste designløsninger for grunnvarmesystemer som bruker løsmasser som en bærekraftig og stabil energikilde. Samtidig skal løsningene fungere som en integrert del av fundamentet til bygningskonstruksjoner. Hypotesen er at integrerte grunnvarmeløsninger bidrar til å redusere investeringskostnadene som kreves ved å etablere grunnvarmesystemer i tilknytning til oppvarming og kjøling av bygg. Prosjektet eies av Malvik kommune og NGI sitter som prosjektleder i prosjektet. BEAR gjennomføres i samarbeid med Winns AS, Fundamentering AS, Noranergy AS og NTNU. Prosjektet er finansiert av Regionalt Forskningsfond Trøndelag (prosjektnummer 321116).



BEAR er delt i fire arbeidspakker (AP) hvor denne rapporten omfatter beskrivelse av arbeider og resultater fra arbeidspakke 2 (AP2 uthevet i Tabell 1-1).

Tabell 1-1: Arbeidspakkebeskrivelse i BEAR-prosjektet.

Arbeidspakker (AP) i BEAR			
AP1: Forundersøkelser	AP2: Pilotprosjekt	AP3: Evaluering	AP4: Formidling
Karakterisering av løsmasser for utnyttelse av grunnvarme tilpasset lokale grunnforhold, klima og brukerbehov ved et aktuelt prosjekt.	Test av en ny og innovativ energiløsning i løsmasser i et lokalt byggeprosjekt i Malvik i form av energi-pel.	Vurdere bærekraft, kost/nytte og energi-utnyttelsesgrad for pilotprosjektet.	Formidle resultater fra BEAR til bransjen i Trøndelag, Norge og utlandet.

2 Områdebeskrivelse

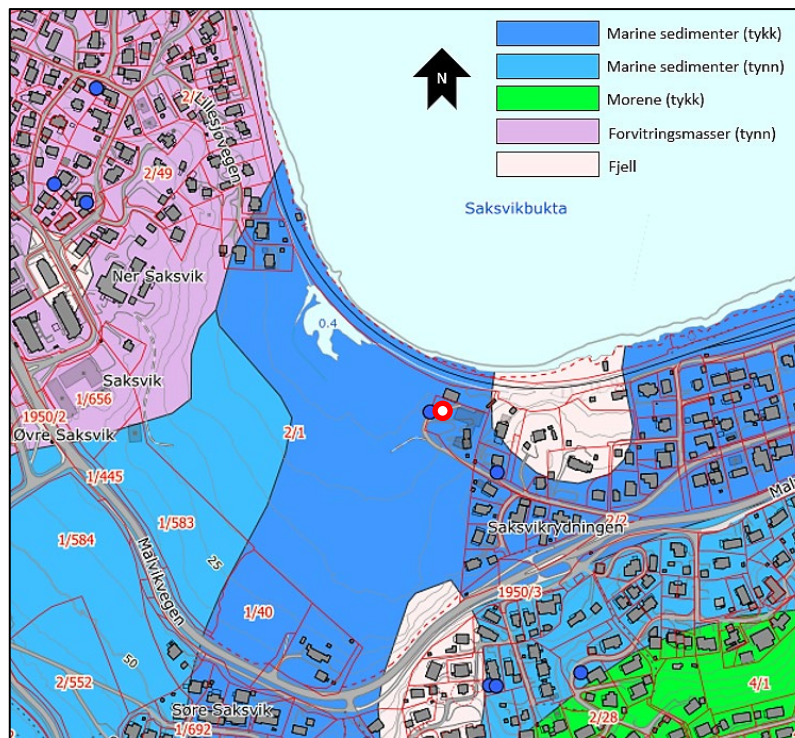
Malvik kommune ligger langs sørsiden av Trondheimsfjorden i Trøndelag fylke like øst for Trondheim by. Prosjektområdet for BEAR ligger i Saksvikbukta i tilknytning til Saksvik renseanlegg (Figur 2-1). Malvik kommune har i forkant av BEAR prosjektet arbeidet med planer om utbedring av eksisterende bygg og det skal bygges nytt bygg for avløpsrenseanlegget. Dette bygget skal fundamenteres på pelere. BEAR prosjektet fikk tilgang til anleggsområdet på tomten og mulighet til å etablere to pilotpeler for feltforsøk med energipeler.

Arbeidet med bygging startet opp våren 2022 med innledende grunnarbeider og omlegging av rørtraseer til et nytt midlertidig renseanlegg til siden for eksisterende bygg. Eksisterende bygg er nå revet og nytt bygg for renseanlegget skal oppføres i løpet av 2023. I forkant av dette arbeidet var BEAR prosjektet inne på tomten og installerte test pelene i løpet av november - desember 2021. Det ble erfart gjennom 2022 at den tilstøtende byggeaktiviteten i området, samt utfordringer med pelenes utforming, hadde påvirkning på de opprinnelig planlagte målemetodene for pelene, noe som begrenset nytten av å gjøre visse planlagte målinger i felt. BEAR-prosjektet måtte følge tilpasse aktiviteten etter forholdene på anlegget.



Figur 2-1: Gamle Saksvik renseanlegg i saksvikbukta i Malvik kommune (bilde: 23 juni 2021).

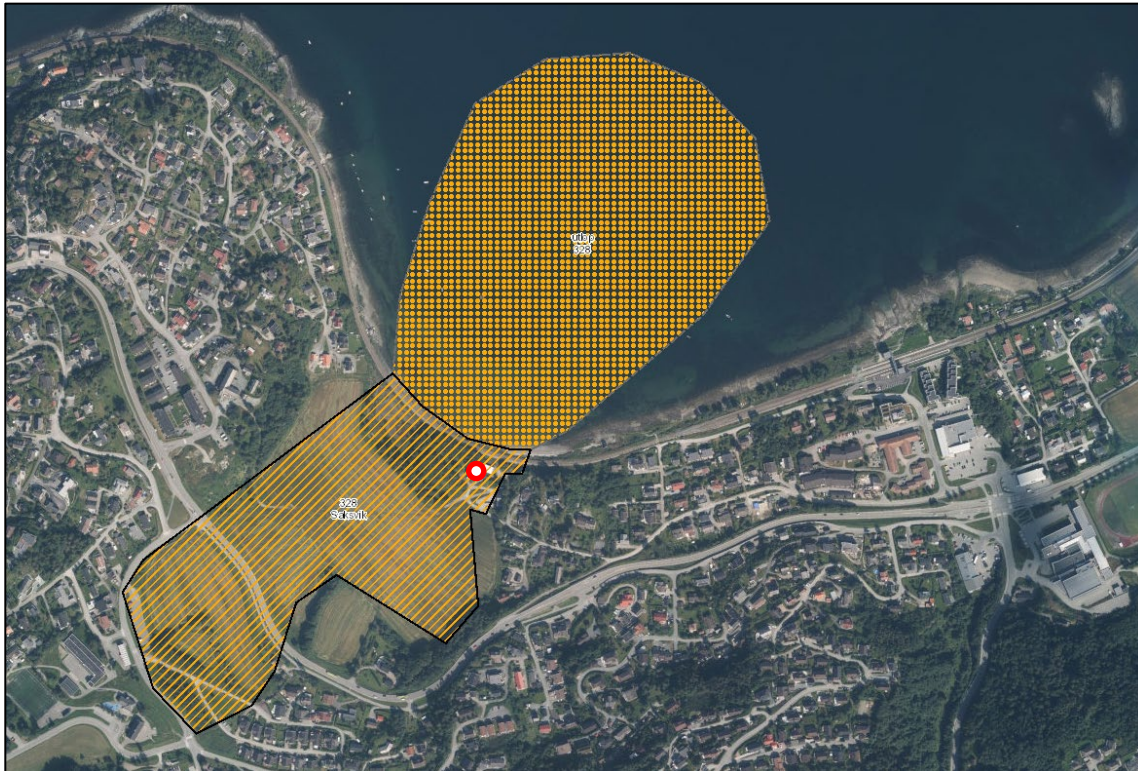
Tomten til Saksvik rensesanlegg ligger rett sør for togsporet til Nordlandsbanen i bunnen av et dalsøkk like ved Trondheimsfjorden. Dalen er i all hovedsak benyttet som dyrket mark, hvor dalsidene er bebygget. Overordnet er området kartlagt av Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) og ligger i et område dominert av marine strandavsetninger og marine sedimenter (leire og silt, Figur 2-2). Langs dalsiden øst og vest for tomten er det påvist relativt grunt til berg, med stedvis berg i dagen.



Figur 2-2: Løsmassegeologi i Saksvikbukta (www.ngu.no). Åtte borede bergbrønner er markert med blå punkter i kartet. Området for BEAR-pelene er markert med rødt/hvitt punkt.

I tilknytning til prosjekteringsarbeidet med nye Saksvik rensesanlegg er det gjennomført en rekke grunnundersøkelser på tomten i forkant av BEAR-prosjektet. BEAR-prosjektet har fått tilgang til de grunnundersøkelser som er gjennomført av NGI i regi av prosjekteringsarbeidet og har fått data om grunnboringer (totalsonderinger, trykksonderinger (CPTU) og poretrykkmålinger), laboratorietester på sedimentprøver for fastsettelse av jordparametere (rutineundersøkelser, ødometerforsøk og treaksialforsøk). Detaljerte beskrivelser av disse er beskrevet i tilgjengelige datarapporter (NGI (2020a); NGI (2020b)). Asplan Viak AS har også undersøkt området og etablerte i desember 2020 en 250-meter dyp bergbrønn på tomten for bruk til konvensjonelt bergvarmeanlegg i nye Saksvik rensesanlegg (Brønn ID: 120602 i NGUs brønndatabase, www.ngu.no). I tillegg til de tidligere undersøkelsene har BEAR-prosjektet gjennomført supplerende grunnundersøkelser i umiddelbar nærhet til pelene med NTNUs geotekniske borerigg i løpet av våren 2022 (totalsonderinger, trykksonderinger (CPTU) og poretrykkmålinger). Disse dataene sammenstilles i kapittel 2.1.

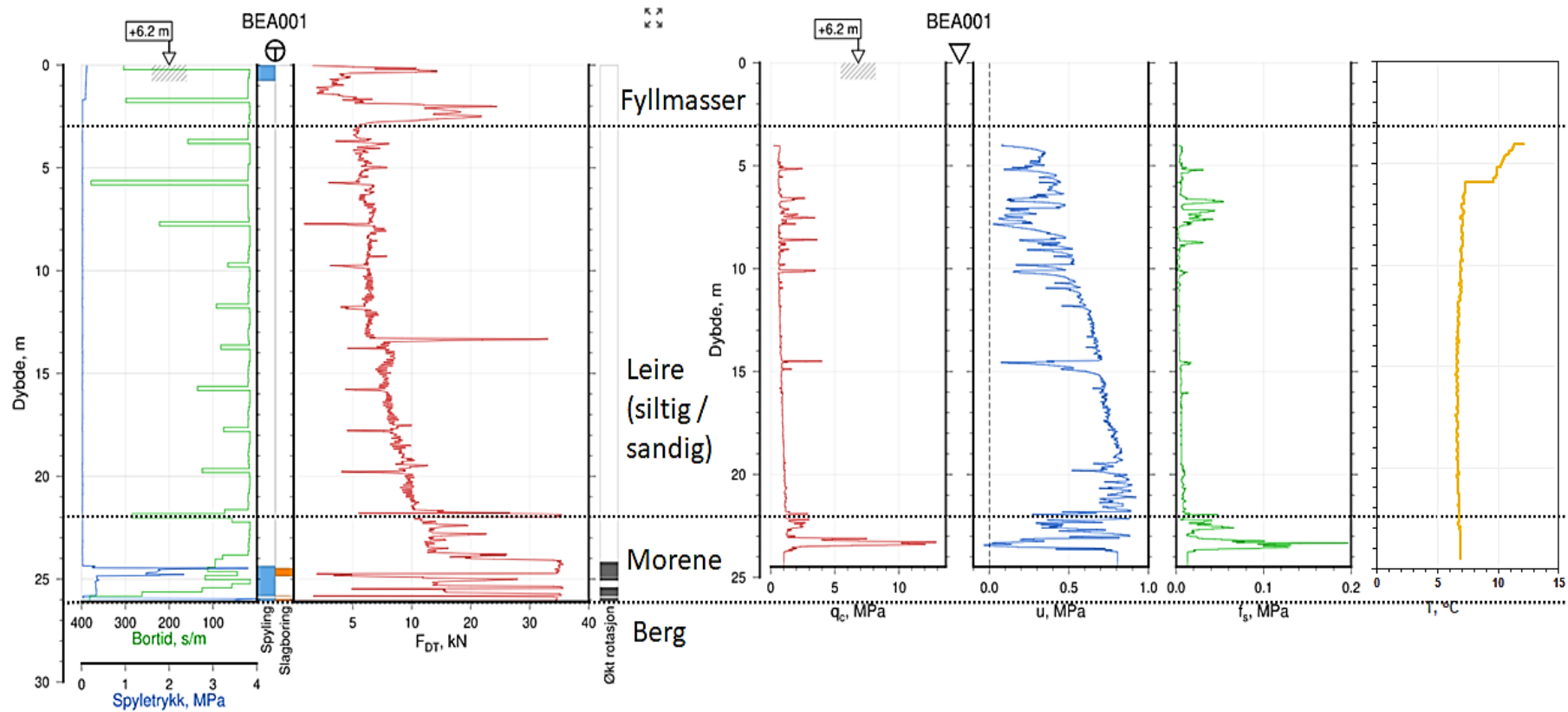
Området for tomten ligger delvis inne på risikoområdet for kvikkleireskred i Saksvik (Figur 2-3) og denne kvikkleiren er påtruffet i noen av grunnboringene og karakterisert i sedimentprøvene.



Figur 2-3: Områdekart over Saksvikbukta markert med risikoområder for kvikkleireskred fremhevet i gul stiplet og gul skravur for henholdsvis løsnemåte og utløpsområdet i bukta (www.NVE.no). Området for BEAR-pelene er markert med rødt/hvitt punkt.

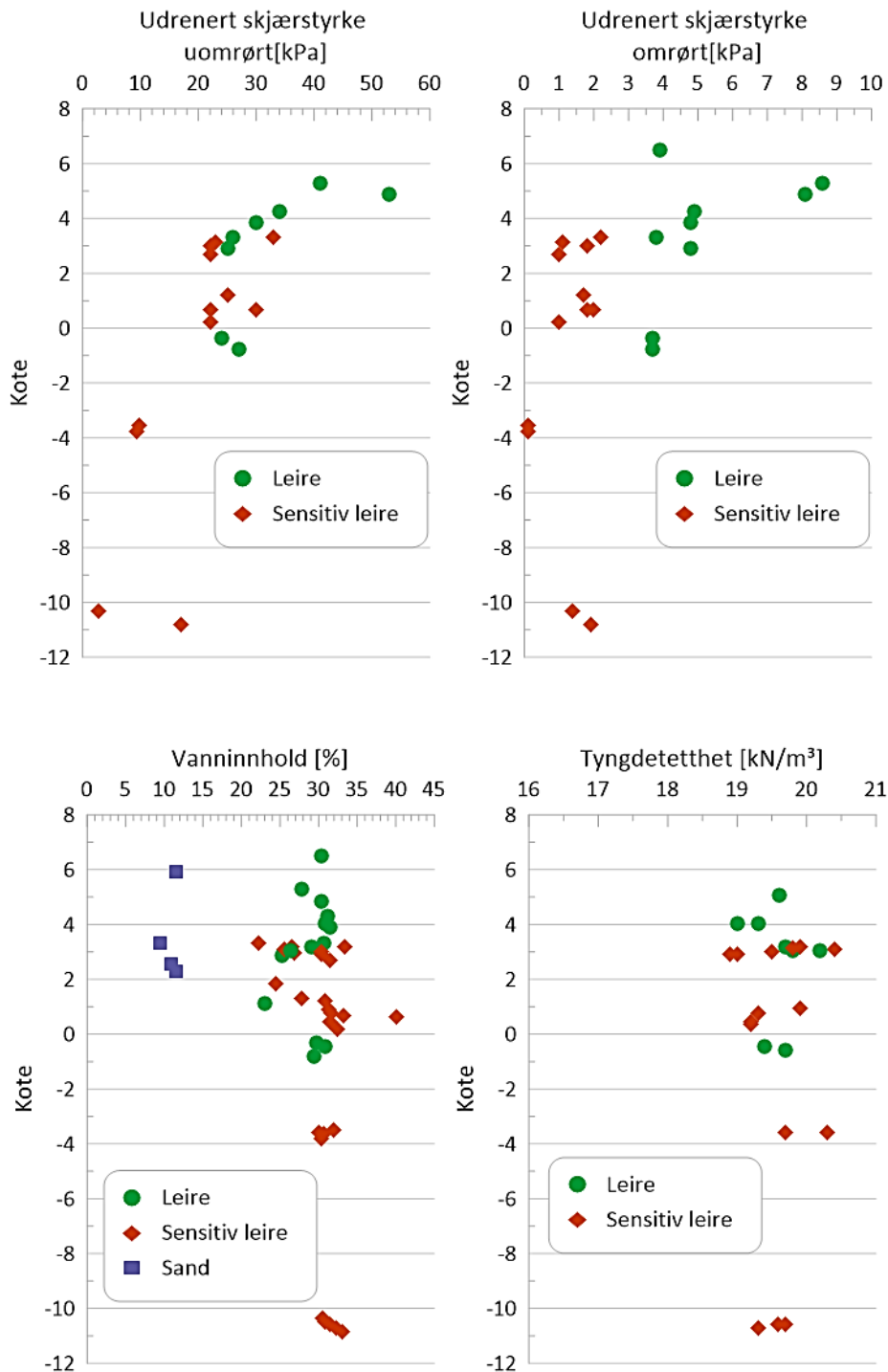
2.1 Grunnundersøkelser

I området på tomten hvor pilotpelene er boret er løsmassene typisk bestående av et 3 meter tykt topplag med grove masser (fyllmasser) over leire, med stedvis siltig og sandig leire i mellomliggende lagsjikt i jordprofilen. I overgangen mot fjell ligger det et grovt løsmassesjikt rett over berg som er vannførende, antakelig en bunnmorene. Tykkelsen på dette grove laget varierer på tomten, men er gjennom grunnboring ved pilotpelene tolket å være 5-6 meter tykt (Figur 2-4). Dybde til berg varierer på tomten, men overordnet viser grunnboringer på pilotområdet at det er mellom 25 – 29 meter til berg lokalt rundt pelene, hvor dybden øker raskt fra øst mot vest. Bergflaten følger sågar terrengets form, hvor dybdene til berg er størst i midtdelene av dalen. Den nærliggende energibrønnen på tomten viser samme tendens, samt tidvis oppkomme av vann, noe som også viser at det er vannførende soner i berget. Poretrykksmålinger registrerte av NGI (NGI, 2020a) indikerer en poretrykksfordeling over hydrostatisk i et målepunkt nærmere jernbanefyllingen mot nordøst (ca. 12 kPa/m og antatt grunnvannstand på 1 m dybde).

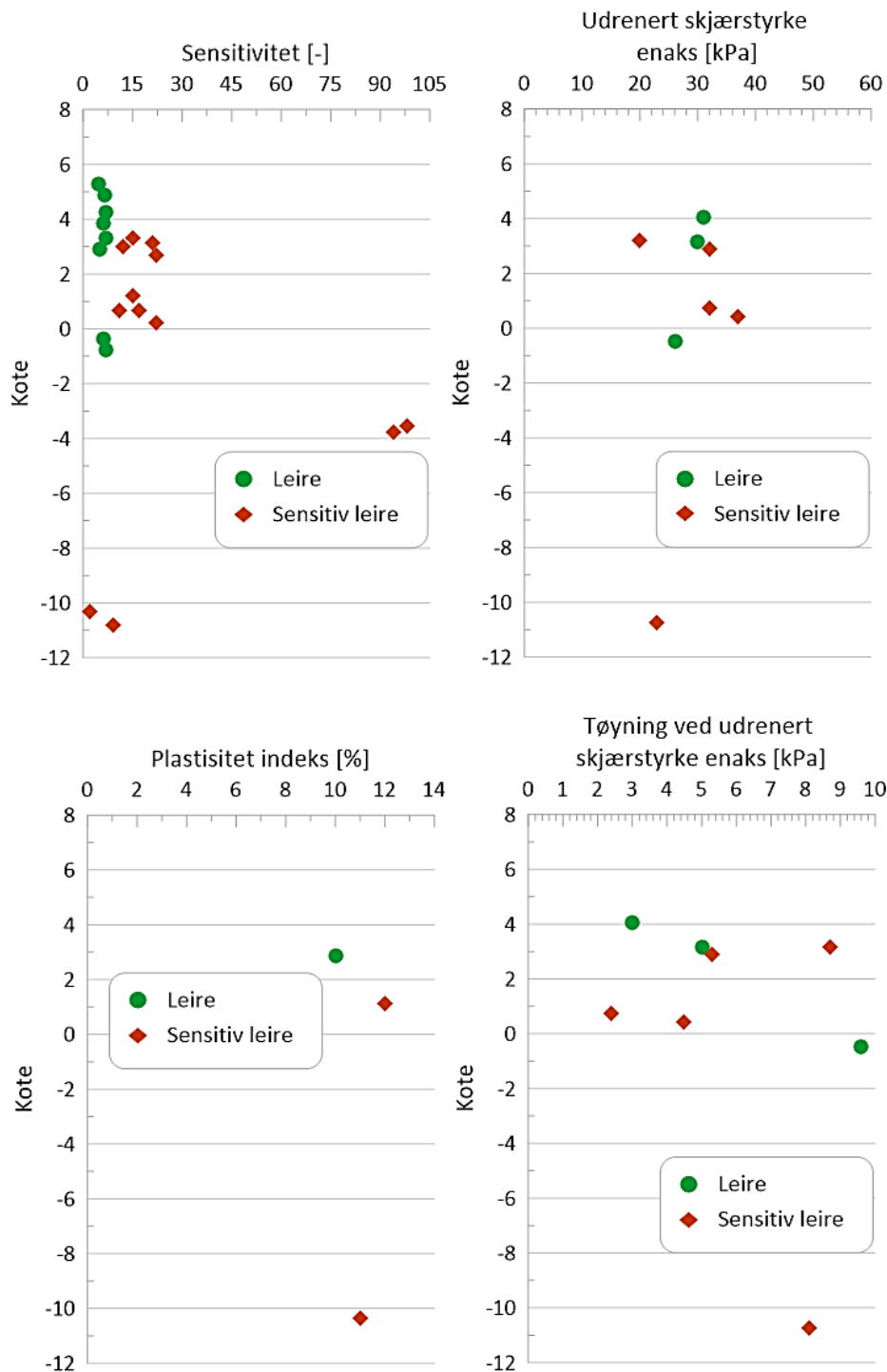


Figur 2-4: Totalsondering og trykksondering (CPTU) utført av NTNU i nærområdet hvor pelene ble installert av Fundamentering AS. Tolkede lagdelingen er markert i figuren.

Indeksparametere for løsmassene i Saksvik-området er vist i Figur 2-5 og Figur 2-6. De sandige massene har et vanninnhold på ca. 9 – 12%. Leiren i område viser et vanninnhold på ca. 25 – 35% med tyngdetetthet mellom ca. 19 – 20 kN/m³. Leiren har relativt lav plastisitet med plastisitetsindeks på omtrent 10% og sensitive styrkeegenskaper (sprøbruddmateriale).



Figur 2-5: Variasjon av indeksparameter ved kotenivå (m.o.h.) i Saksvik (NGI, 2020a).



Figur 2-6: Variasjon av indeksparameter ved kotenivå (m.o.h.) i Saksvik (NGI, 2020a).

Leire med et vanninnhold på ca. 25 – 35% og tyngdetetthet mellom 19 – 20 kN/m³ innehar typisk en porøsitet på ca. 45 – 51 %. Den volumetriske varmekapasiteten til leiren er dermed antakelig i størrelsesorden ca. 0,85 – 0,90 kWh/m³/°C.

3 Energipeler - design aspekter

Energipeler som konsept skiller seg ut fra konvensjonelle peler ved at de må oppfylle to funksjoner i bygget:

- Primære funksjon: et stabilt og stødig fundament for bygget.
- Sekundære funksjon: å fungere som energikilde eller energilager for bygget med mål om å dekke deler av byggets varme- og kjølebehov.

Denne dobbeltfunksjonen setter både designføringer for hvordan pelen kan utformes og hvordan varmesystemet kan driftes. Det er i all hovedsak grunnforholdenes lastbærende evne og pelens mekaniske styrke som er dimensjonerende for pelens størrelse, lengde og overordnede utforming. Detaljert informasjon om dette kan fås i Peleveiledningen (Pelekomiteé, 2019). Samtidig er det vekten av bygget som avgjør hvor mange peler et bygg vil få bruk for. Det vil si at det ikke bygges supplerende peler ene og alene for å dekke større andel av energibehovet. De energibærende systemene i pelen må tilpasses innenfor akseptable rammer for å sikre at temperaturvariasjoner ikke forringer pelens funksjonskrav og lastekapasiteter. Samspillet mellom mekanisk styrke, energidekning og termisk effekter er et nytt aspekt i dimensjoneringen av grunnvarmesystemer her til lands, spesielt i forhold til konvensjonelle grunnvarmeløsninger med energibrønner i berg.

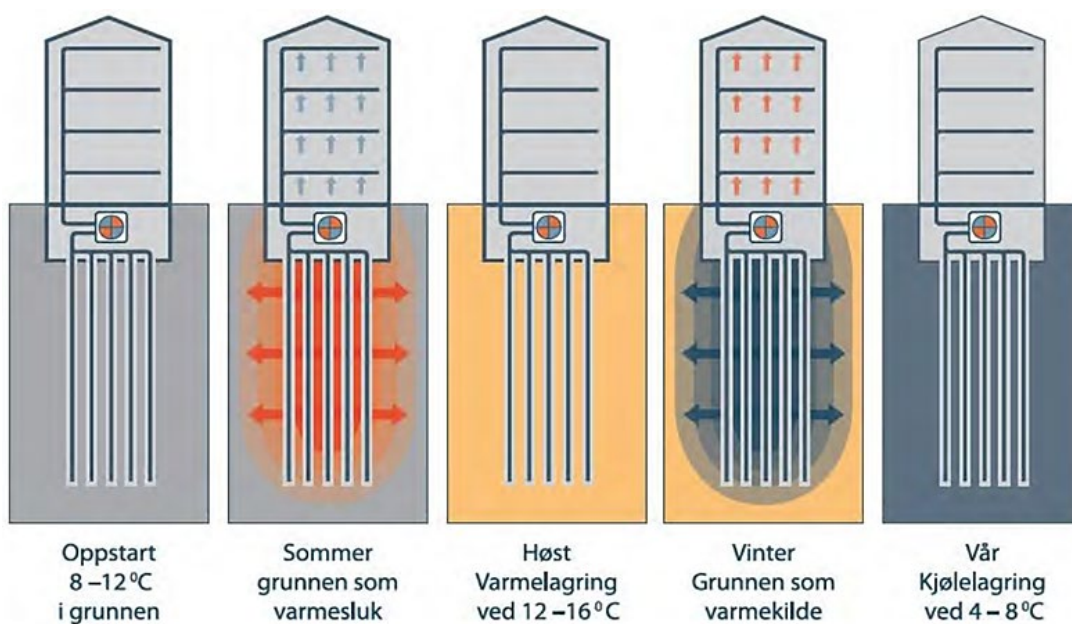
3.1 Peler som energikilde og energilager

Energipeler som konsept faller inn under kategorien "*lukkede anlegg*" i grunnvarmefaget, slik som energibrønner i berg. Grunnvarme er omgivelsesenergi lagret i jord, berggrunn og grunnvann i form av varme. I lukkede anlegg hentes denne varmen ut via væskefylte rørføringer som installeres i disse omgivelsene. I Norge innebærer bruk av grunnvarme utnyttelse av lave temperaturer fra jord, berggrunn og grunnvann (typisk fra 2°C – 8°C) ved å bruke en væske-vann varmepumpe for å løfte temperaturen til ønsket distribusjonsnivå for romoppvarming og oppvarming av varmt tappevann. Vanlige synonymer for slik grunnvarme er bl.a. geoenergi, geovarme, lav-temperatur geotermisk energi, grunn geotermisk energi m.m.

I Norge har løsmassene relativt kalde temperaturer hele året. De øvre lagene med jord kan gjerne fryse til is i løpet av vintermånedene, mens dypere jordlag gjerne har stabilt lave temperaturer uavhengig av årstiden. Å hente energi fra løsmassene via fundamenteringspeler kan derfor by på utfordringer fordi løsmassene kan bli for kalde og forårsake utfrysing av den omkringliggende jorden under bygget. Dette kan forårsake setninger og skader på bygget og må unngås. I praksis betyr dette at energien som er tilgjengelig i løsmassene for varmeuttak er begrenset til et nedre temperaturnivå som må ligge over frysepunktet for vann, f.eks. >2°C.

Grunnvarmeanlegg generelt bygges for å dekke et varmebehov eller et kjølebehov i et bygg, men systemet er spesielt gunstig hvis det kan utformes som et varmelager med balansert varme-uttak og tilbakeføring av varme over ulike perioder av året. På denne måten kan grunnen betraktes som et varmebatteri eller en lagertank for varme der

sommerens overskuddsvarme lagres til bruk på kalde vinterdager. For konvensjonelle grunnvarmesystemer i Norge foregår denne lagringen i berg, via borehull, mens for energipeler vil lageret være løsmassene som ligger omkring pelene under bygget. For å nytte peler i Norge til energiformål sees det som avgjørende at systemet driftes som et varmebatteri som sikrer at temperaturnivået ligger godt over frysepunktet for vann hele året. I Figur 3-1 sees en konseptuell skisse over hvordan et slikt lager vil kunne driftes over året. Den varmen som trengs på vinteren tilføres løsmassene i løpet av sommeren og høsten.



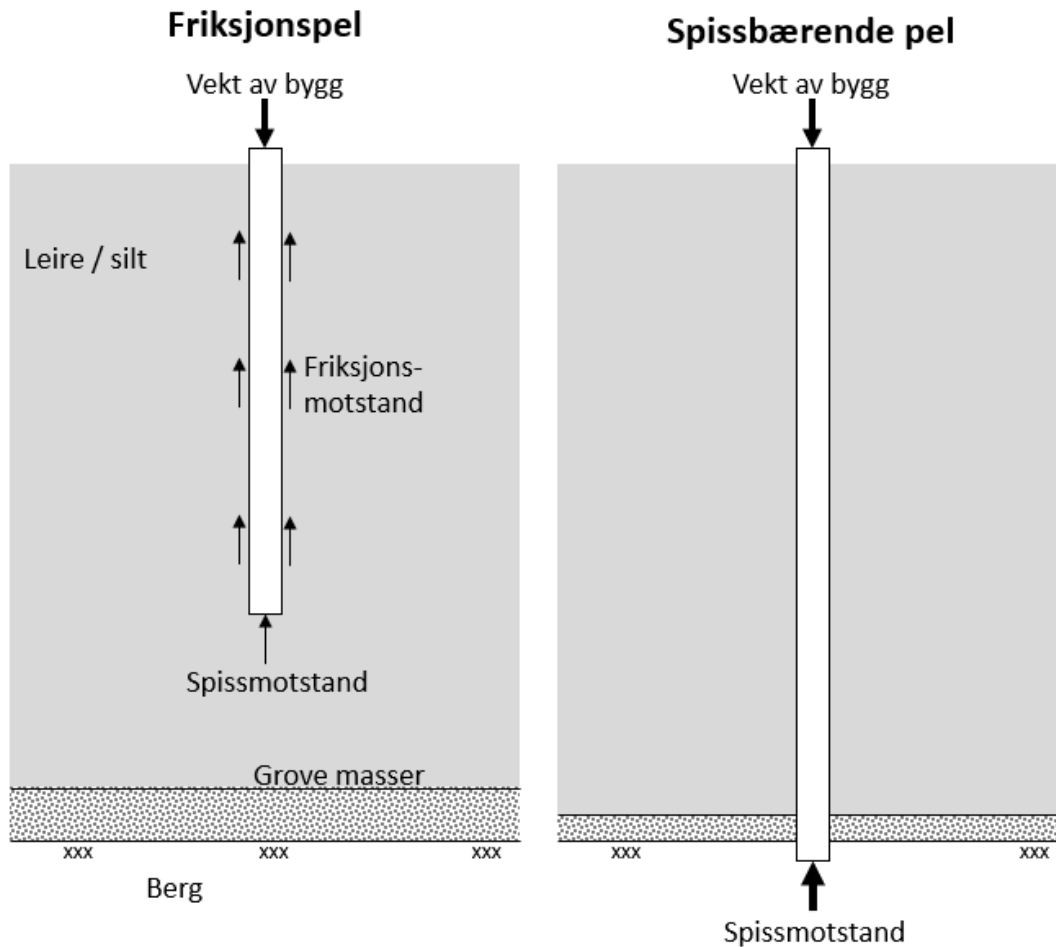
Figur 3-1: Prinsipiell skisse for et energilager i løsmasser med energipeler (Ramstad, 2011).

Dette er ideelt for store bygg med kombinert oppvarmings- og kjølebehov i ulike deler av året. For bygg uten kjølebehov eller for bygg med mindre kjølebehov enn varmebehov, kan balansen i energilageret opprettholdes ved å tilbakeføre annen overskuddsvarme fra eksterne kilder. For eksempel fra uteluft, overflatevann eller solvarme – enten via tradisjonelle solfangere, eller bakkesolfangere osv.

3.2 Mekanisk design – de vanligste peletutformingene i Norge

Ved fundamentering med peler er det en rekke faktorer som har innflytelse på valg av optimal utforming og peleløsning for et gitt bygg. I Tabell 3-1 og Tabell 3-2 vises de vanligste peletypene som benyttes i Norge, hvor det er vesentlige forskjeller i lastbærende kapasiteter og installasjonsmetoder. Uavhengig av installasjonsmetode vil pelene ha som funksjon å fordele lasten (vekten) av bygget over til grunnen, enten i løsmassene eller i underliggende berg. Det skiller primært mellom friksjonspeler og spissbærende peler (Figur 3-2).

Lastoverføringen i **friksjonspeler** gjøres gjennom heft og friksjon langs pelens overflate til jordlag omkring pelen og med et mindre endebidrag av motstand fra spissen av pelen (Pelekomité, 2019). Lastoverføringen i **spissbærende peler** overføres primært kun gjennom spissen av pelen til fast berg eller et fast jordlag rundt spissen. Sidefriksjonen fra jordarten er da såpass liten at den ikke medregnes i bæreevnen til pelen.



Figur 3-2: Forenklet prinsippskisse for lastoverføring for enkeltpeler.

Ved valg av peletype vil det være en rekke forhold som avgjør hvilken type som er mest gunstig for et gitt prosjekt. Hovedpunktene som må vektes i denne avgjørelsen er hvilke **laster**, **grunnforhold** og **naboforhold** som er aktuelle for prosjektet. **Anleggstekniske forhold** og **markedsituasjonen** vil også ha avgjørende innvirkninger på pris og leveringstid. I sum er det derfor vanskelig å fremheve en foretrukken pelel sning for energipel konseptet generelt. Forskjellene i installasjonsmetode er antakelig en av hovedforskjellen mellom ulike peler som avgjør hvor enkelt det vil være å nytte peler til energiformål. Det skiller primært mellom *rammede* og *borede* peler.



Figur 3-3: Boring av stålrørspeler er en vanlig installasjonsmetode i Norge (www.FAS.no)

Rammede peler omfatter ulike former for prefabrikkerte betong- eller stålelementer som slås ned i bakken med tunge lodd. Ved nedramming vil løsmassene fortregnes ettersom pelen rammes, noe som kan være forstyrrende for visse løsmassetyper, samt at arbeidene kan være svært støyende for naboer. For rammede prefabrikkerte peler må et eventuelt energisystem installeres på pelen før pelen rammes.

Borede peler benytter både lettere bormaskiner eller tung borustrustning til å bore ned pelen. Løsmassene blir da spylt opp til overflaten og dette ansees som en mer skånsom installasjonsmetode for løsmassene, samt mindre støyende for naboer. For borede peler vil energisystemet kunne installeres etter at pelen er boret, noe som er en stor fordel.

Tabell 3-1: Aktuelle peletyper i Norge med typiske spesifikasjoner (Pelekomité, 2019)

Peletype	Installasjons-metode	Dimensjonerende tverrsnitts-kapasitet [kN]	Aktuelle lengder [m]
Betongpeler	Rammede	1 500 – 3 000	8 – 50
Stålpeler	Rammede	2 000 – 7000	20 – 70
Stålrørspeler	Rammede	4 000 – 16 000	20 – 70
Stålrørspeler	Borede	1 000 – 25 000	10 – 50
Stålkjernepeler	Rammede / borede	1 000 – 5 700	5 – 70
Plasstøpte peler	Borede /dreide	5 000 – 25 000	5 – 50

Tabell 3-2: Aktuelle peletyper i Norge med typiske spesifikasjoner (Pelekommité, 2019)

Peletyper med aktuelle dimensjoner	Typiske tverrsnitt
Betongpeler - lasten bæres primært av betongen Bredde (B): 235 mm – 345 mm Kvadratiske peler	
Stålpeler (HP-peler) - lasten bæres av stålet Bredde (B): 224 mm – 402 mm Bredde (b): 210 mm – 372 mm Ståltykkelse: 11 mm – 26 mm	
Stålrørpeler - lasten bæres primært av stålet Små (rammede/borede) Diameter (D): 115 mm – 324 mm Rørtykkelse: 6.3 mm – 12.5 mm Store (rammede) Diameter (D): 324 mm – 1220 mm Rørtykkelse: 6.3 mm – 20.0 mm	
Stålkjernepeler - lasten bæres av stålkjernen (d) Diameter (D) foringsrør: 115 mm – 324 mm Diameter (d) stålkjerne: 70 mm – 230 mm	
Plasstøpte peler - lasten bæres primært av betongen Diameter (D) pilar: 750 mm – 1 500 mm Opptil D=3 000 mm er mulig	

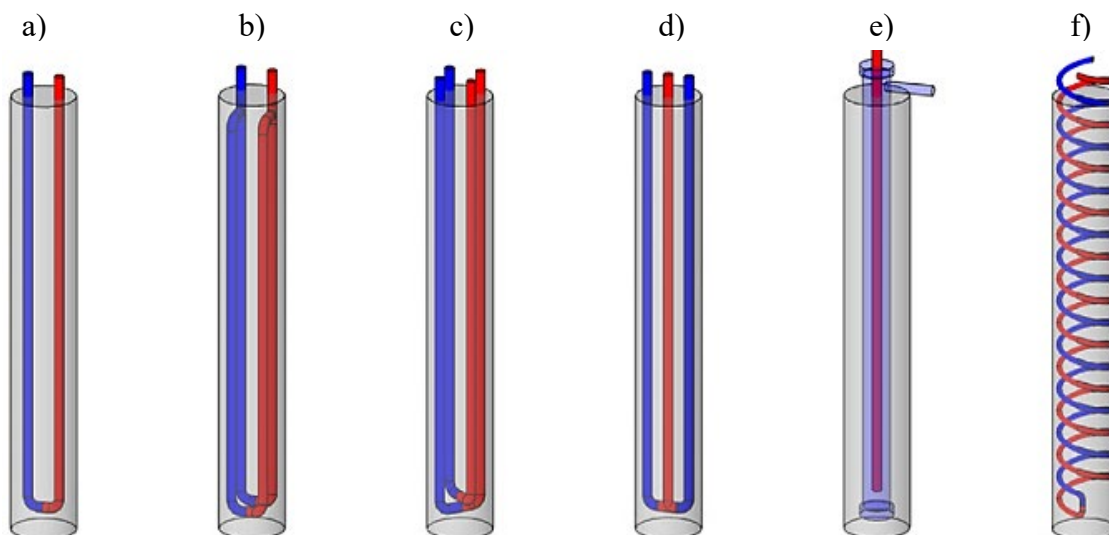
3.3 Termisk design – "State of the art" - Energipeler

Forskjellen mellom vanlige peler og energipeler er i praksis at det integreres et sett med rørføringer i pelen. Rørene har som funksjon å fordele temperert væske langs med pelens lengde. Væskens temperatur blir kontrollert av byggets varmesystem og avhengig av temperaturen på væsken brukes dette enten til oppvarming av - eller nedkjøling av bygget. Væsken har som formål å endre pelens temperatur slik at omkringliggende løsmasser responderer på temperaturendringen ved å avgi varme til pelen (varme opp pelen) eller hente varme ut av pelen (kjøle ned pelen). Den varmen som løsmassene avgir/tilfører pelen tas opp av væsken og benyttes således til å temperere

bygget, slik som ellers for konvensjonelle grunnvarmeanlegg. Energipeler med integrerte rør kan i utgangspunktet utformes for alle typer peler (Figur 3-4), men er i Europa i størst grad benyttet på plasstøpte peler (Fadjevje et al; 2017).

Det er i hovedsak varmeoverføringsevnen til og fra løsmassene som bestemmer varmeoverføringsraten, og dermed den termiske effekten (kW), som en pel vil kunne oppnå mot løsmassene. Varmeoverføringsraten vil, sammen med pelens dimensjoner og rørføringsystem, avgjøre hvor varm/kald pelen må bli for at energien i løsmassene skal kunne hentes ut tilstrekkelig raskt og nyttes i et varmepumpesystem som har krav om å produsere en viss mengde varme til bygget. En vanlig metode for å optimalisere denne varmeoverføringen på er å integrere mange eller lange rørføringer i én og samme pel.

Det er flere likheter med utforming av enegipeler og vanlige energibrønner i berg. Den vanligste og enkleste måten å integrere rør på er å benytte en kortversjon av den vanlige U-kollektoren som eller brukes i energibrønner (Figur 3-4a). Andre rørvarianter og konfigurasjoner (Figur 3-4b-f) er utviklet for å få utnyttet større deler av pelens overflate hvor hovedformålet med designet er å oppnå best mulig varmeoverføringsrate for pelen. Vanlige rørtyper og rørdimensjoner er typisk PEX-rør eller PE-rør med Ø25 mm – Ø32 mm ytre rør diameter. Den beste kollektor-varianten er coaxial- kollektoren (Figur 3-4e) som har et rør-i-rør-system sentrert i pelen med vesentlig større rørdimensjoner enn vanlige kollektorer. Denne typen kollektor er imidlertid kun egnet for stålrørspeler eller plasstøpte peler som har rom for denne typen installasjon.



Figur 3-4: Prinsipiell utforming av plasstøpte peler med integrerte rørføringer for energioverføring av varme og kulde (Fadjevje et al; 2017).

En oversikt over mulige rør-plasseringer er skissert i tverrsnittene i Tabell 3-3 for de aktuelle peletypene. For rammede prefabrikkerte peler (betongpeler og stålpeler) må kollektor-rørene installeres før pelen rammes. Disse må dermed støpes inn i betongpelen eller sveises på stålpelene på forhånd på en slik måte at rørene ikke tar skade av

rammingen etterpå. Dette kan være en utfordring for stålpeleer spesielt, hvor rørene må festes utenpå pelene på en slik måte at de ikke vanskeliggjør rammingen og påfører økte kostander. Å utbedre skader på rørene i ettertid er vanskelig.

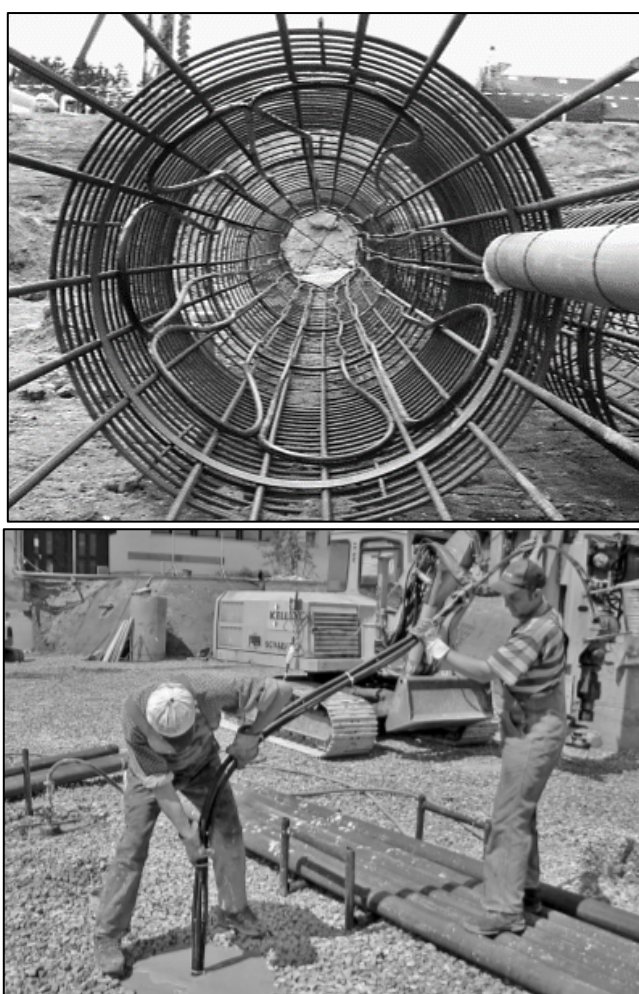
For borede peleer (stålrør-, stålkjerne- og støpte peleer) kan kollektorrørene installeres etter at boringen i løsmassene er ferdigstilt. Rørene utsettes dermed ikke for de tøffe installasjons-påkjenningene og kan i større grad tilpasses pelens utforming i etterkant. Noen eksempler på slik utførelse i andre land er vist i Figur 3-5 og Figur 3-6 under.

Tabell 3-3: Mulige løsninger for integrering av kollektor-rør i ulike peletyper.

Peletype	Modifiserte tverrsnitt
<p>Betongpeleer Kollektor-rør støpes inn i betong før de rammes med fallodd. Rørene må skjøtes på anleggsplassene hvis pelene er lange (>13 m).</p>	
<p>Stålpeleer (HP-peleer) Kollektor-rør må påmonteres før ramming med fallodd. Hvis HP-pelene er lange (>13 m) må de sveiseskjøtes på anleggsplassene, noe som kan vanskeliggjøre feste av rør utenpå pelene.</p>	
<p>Stålrørspeler Kollektor-rør kan monteres etter boring og tilpasses rørdimensjonen. Det er mulig å integrere de fleste løsninger som er vist i Figur 3-4</p>	
<p>Stålkjernepeler Kollektor-rør kan monteres etter boring og tilpasses rørdimensjonen. Det er begrenset med plass for rør i denne peletypen. Vanligvis benyttes mellom 15-20 mm rom mellom stålrøret og stålkjernen.</p>	
<p>Plasstøpte peleer Kollektor-rør kan monteres etter boring og tilpasses peledimensjonen. Det er mulig å integrere de fleste løsninger som er vist i Figur 3-4.</p>	



Figur 3-5: Montering av kolektorslanger på forhånd i armeringen er en vanlig metode som er mye brukt til plaststøpte peler. t.v. sees en spiralkollektor (ref. Figur 3-4e), mens t.h. sees en dobbelt U-kollektor (ref. Figur 3-4b) (Zarrella et al., 2013)



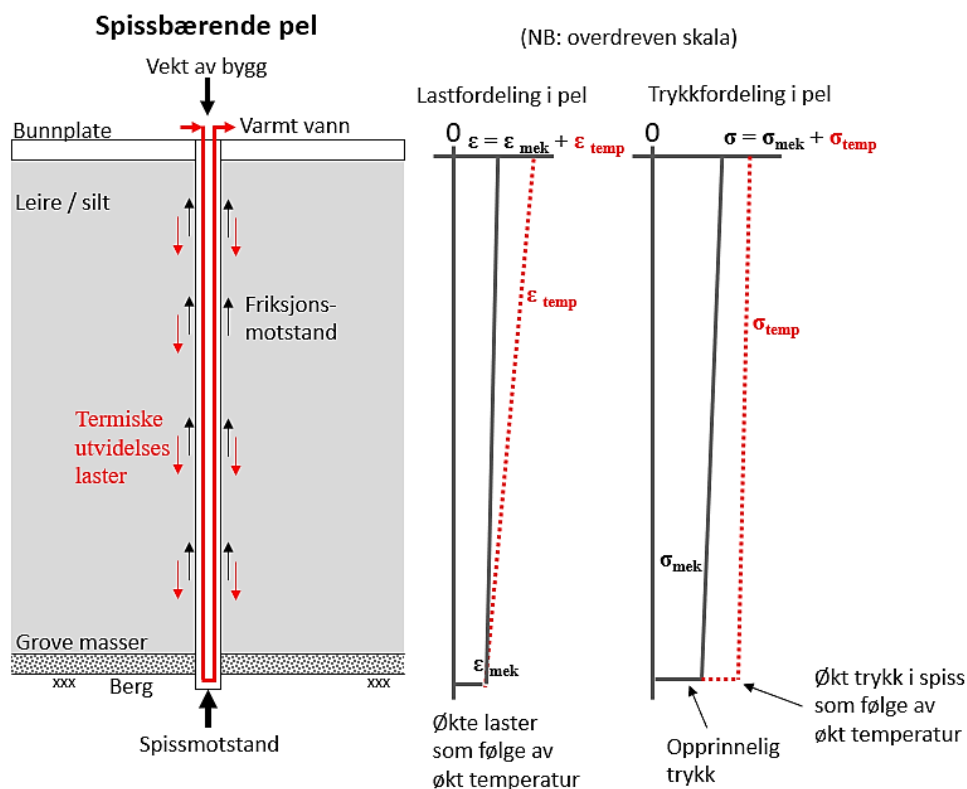
Figur 3-6: Øverst: montering av lange sløyfer av kolektorslanger i store plaststøpte peler er en måte få store mengder rør i en og samme pel. Nederst: I ferdigstøpte stålørspeler uten armering kan kolektoren monteres før betongen herder (Brandle, 2006)

3.4 Temperaturenens påvirkning på peler

Temperaturrendringer i pelen har innflytelse på flere forhold i fundamentet. De vesentligste forholdene har innflytelse på pelens bæreevne og kan påvirke pelens levetid. Dette gjelder først og fremst termisk respons forårsaket av temperaturrendringer i:

- *Fundamentet*: temperaturrendringene gjør at pelen utvides og trekkes sammen, såkalt termiske ekspansjon. Graden av ekspansjon i stål og betong er avhengig av hvor stor temperaturrendringen er og hvor lang pelen er.
- *Løsmassene*: temperaturrendringene gjør at løsmassene utvides og trekkes sammen. Denne ekspansjonen kan påføre spenningsendringer i jorden og bl.a. endre *poetrykk i løsmassene*. Slike endringer kan gi setninger.
- *Korrosjon*: bestandighet og levetid på stål og betong er avhengig av hvor fort materialet korroderer og krakelerer. Økte temperaturer vil øke korrosjonshastigheten og dette vil kunne fremskynde aldringsprosessen.

Det er spesielt den termiske responsen i fundamentet og i løsmassene som setter begrensninger på hvor mye temperaturen kan endres under gitt forhold. Det skiller mellom hvordan dette gir seg utslag i friksjonspeler og spissbærende peler. Ved temperaturøkning vil pelen utvide seg i vertikal retning, men spesielt for spissbærende peler vil denne utvidelsen være låst til å gå oppover, i retning av bygget (Figur 3-7). Dette vil potensielt kunne "løfte bygget" hvis utvidelsene blir for store (Laloui og Loria, 2020).



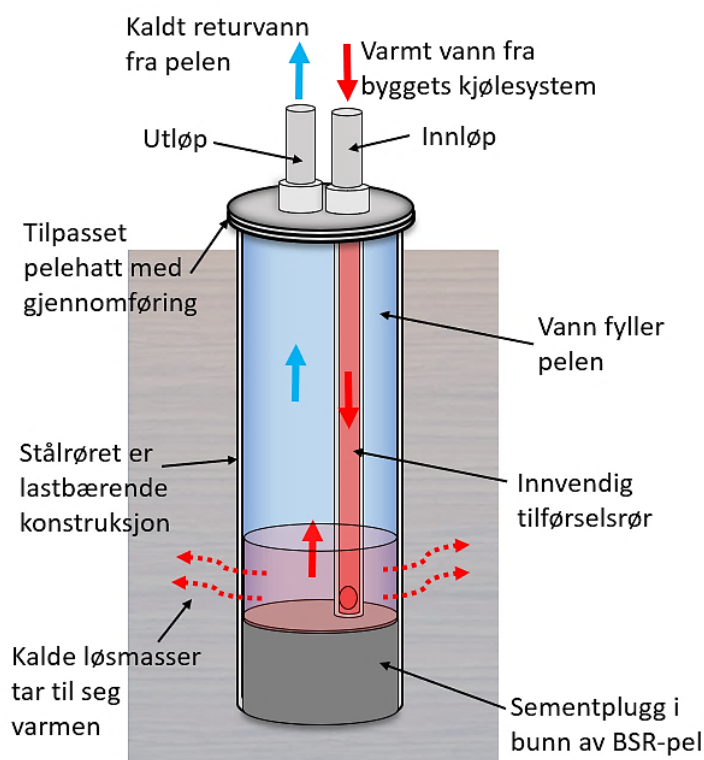
Figur 3-7: Termisk respons i fundamentet som følge av temperaturøkning i pelen. En motsatt effekt inntreer når pelen kjøles ned.

4 Pilotpeler i BEAR

I BEAR prosjektet er det testet ut et nytt konsept for energipel som tar utgangspunkt i at pelen skal fungere som et sesongvarmelager for et bygg. Valgt av peletype er gjort med hensikt om å oppnå best mulig termisk effektpådrag over korte tidsperioder. Dette vil si at pelen skal være både "effekt-pel" og "energi-pel" som i størst mulig grad skal kunne dekke opp små effekttopper i et byggs varme- og kjølebehov.

For å dekke effekttopper er det avgjørende at byggets varmesystem har tilgang på store mengder væske. Prinsippet i BEAR-pelene er at pelene utformes som en vanntank, hvor hver pel skal romme så mye vann som mulig. Denne utformingen minner i stor grad om coaxial-kollektoren som er skissert i Figur 3-4e. I forhold til de ulike peletypene listet opp i Tabell 3-1 er dette konseptet enklest å få integrert i stålrørspeler eller plasstøpte peler hvor det er relativt god plass. Borede stålrørspeler (BSR-peler) er ansett som det beste alternativet i Saksvik på grunn av: pelens utforming, skånsomme installasjonsmetode, løpemeterpris, grunnforhold, størrelse på borerigg, tilgjengelighet og fleksibilitet av utstyr. BSR-peler skal også nyttes i det nye rensaneanlegget på tomten.

I BSR-pelen har selve stålrøret funksjon som lastbærende konstruksjon og all last skal kunne holdes av stålrørets styrke. Vanligvis vil innsiden av pelen fylles med betong, men i BEAR-pelene er dette hulrommet være fylt med vann som settes under trykk. Vannet står i direkte kontakt med stålet og dette gjøre at pelen får størst mulig vannvolum lagret i pelen og best mulig varmeoverføring mot løsmassene (Figur 4-1).



Figur 4-1: Prinsippskisse av vannfylt BSR-pel i BEAR-prosjektet i Saksvikbukta.

For pilottesten er det valgt å teste to ulike størrelser og lengder av BSR-peler, samt å se på forskjeller mellom friksjonspjel og spissbærende pel. Pelene ble boret med ca. 1 meter innbyrdes avstand mellom rørveggene.

Liten stålrørspel: Friksjonspjel som kun står i løsmasser (siltig, sandig leire)
Ytre diameter Ø139 mm med 4,0 mm godstykkelse
21 meter lengde stålrør hvor ca. 1,0 meter står over terreng

Stor stålrørspel: Spissbærende pel som står helt ned til berg
Ytre diameter Ø323 mm med 4,0 mm godstykkelse
27 meter lengde stålrør hvor ca. 0,5 meter står over terreng



Figur 4-2: BEAR-prosjektets pilotpeler ferdig installert sommeren 2022.

4.1 Installasjon og gjennomføring (sammenstilte protokoller)

Oppstart av borearbeidene startet morgenen mandag 6. desember 2021. Malvik kommune hadde i forkant markert borepunktene med spray på bakken på en liten planert pukkfylling ved siden av grusveien ned til lagerteltet i nordenden av tomten (Figur 4-3).



Figur 4-3: Utsatt plassering av BSR-peler er ca. 10 meter fra eksisterende energibrønn.



Figur 4-4: Oppstart boring av $\varnothing 323$ mm stålørpel. T.v. Rørleger og boretrusting for 3 meter rørdeler. Hver rør-seksjon må sveises sammen. T.h. Første sveisesøm mellom rør 1 og 2. Brunlige grove løsmasser fra de første 2 meterne er ansamlet rundt røret.

Det ble benyttet en "liten borerigg" (KLEMM KR-806-5) med luftspyling og 3-meter rørlengder for boringen (Figur 4-4). Hver rørdel sveises sammen før videre boring til ønsket dyp. For 4 mm godstykkelse er det vanlig å benytte enkel sveis. Det ble påtruffet brunlige grove løsmasser de første 2 meterne, som er tolket som toppjord og fyllmasser eller tilkjørte masser. Bløt leire ble påtruffet fra ca. 2-3 meter og videre nedover før berg ble påtruffet ved ca. 26 meters dyp. Leiren var relativt seig og klebet seg til utstyret. Dette ga utfordringer i det uventet kalde været (-10 °C) og det ble benyttet betydelig med tid til å smelte og fjerne fryst leire og slam fra boreutstyret mellom hver arbeidsdag. De vanskelige boreforholdene gjorde også at det første forsøket på å bore Ø323 pelen endte med et brudd i sveisesømmen halvveis ned i løsmassene. Bruddet gjorde det umulig å trekke opp stålet og denne pelen måtte da ansees som tapt.



Figur 4-5: Bløt leire fra 2-3 meter og videre før berg påtreffes ved 26 meters dyp. Leiren er relativt seig og renner ikke unna. Brukt mest luft for spyling, men noe vann for å lette på heften til rørveggen. Frost gjorde imidlertid at vannet og leiren fort frøs til is.

Den store pelen (spissbærende pel) ble totalt 27 meter lang og boret ned til fast fjell ved ca. 26 meters dyp og videre 0,5 meter inn i fjellet. En halv meter av røret ble dermed stående over terreng. Den lille pelen (friksjonspel) ble totalt 21 meter lang og boret 20 meter ned i leiren. En meter av røret ble stående over terreng. Pelene ble avsluttet med en viss rørlengde over terreng fordi pelene står i foten av et område som på et senere tidspunkt skal fylles ut med en jordfylling.

Etter at den endelige boringen ble ferdigstilt ble pelene stående åpne over natten før de kunne tettes med sement i bunnen. Etter avsluttet boring fyltes pelene relativt raskt med grunnvann, som man da antok kom inn gjennom rør-åpningen i bunnen av pelene (Figur 4-6). I den store pelen stoppet dette vannet å stige da vannsøylen var ca. 40 cm over terrengnivå, mens i den lille pelen stoppet aldri vannet å stige. Her rant vannet over rørkanten, 1 meter over terrenget. Begge pelene hadde følgelig artesisisk trykk, noe som tidligere grunnundersøkelser i området indikerte (NGI, 2020a).



Figur 4-6: Ferdig installert \varnothing 323 mm pel og \varnothing 139 mm pel. Ca. c/c 1 meter mellom pelene. Det ble observert rennende vann over kanten av røret til den lille pelen noe tid etter boring var avsluttet (10. desember 2021).

4.2 Problemer med artesisk trykk og med installasjonen

Sementpluggene i bunnen av pelene skal tette mot vannlekkasjer og gjøre pelen til en tett vanntank. Den 11. desember ble det støpt med vanlig portlandkalksement (Skövde bygcement: CEMII/A-LL 42,5 R), med ca. 40 liter ferdig blanding i den store pelen og ca. 20 liter i den lille. Dette tilsvarer en plugg på henholdsvis 0,5 meter tykkelse i den store pelen og ca. 1,5 meter tykkelse i den lille pelen. Etter ferdig støp av sementpluggene ble pelene inspisert jevnlig for å kontrollere for vannlekkasjer.



Figur 4-7: Måling av vannmengde 14. desember. Målt fra topp av pel med 12 liters murerbøtte og provisorisk trakt. Vannet var klart i fargen og strømmet jevnt over rørkanten. Fylte bøtte a 12 liter på ca. 22 minutter tilsvarer ca. 0,55 liter/min.

Den store pelen fremsto tidlig å være tilstrekkelig tettet, mens den lille pelen viste seg å ikke la seg tette med 20 liter sement. En kontinuerlig jevn vannstrøm fortsatte ut av pelen (Figur 4-7). Vannet var klart i farge og inneholdt kun små mengder partikler. Dette er ikke typisk vannkvalitet hvis vannet kommer fra leire. Lodding av pelen viste at måleloddet kunne senkes helt ned til borskoen i enden av pelen ved 20 meters dyp. Dette tydet på at all sement var vasket ut i løpet av natten.

For å vurdere veien videre ble det foretatt en forenklet vannmåling med en murerbøtte. Vannlekkasjen tilsvarte i snitt 0,55 liter/min. Denne raten og grunnvannstrykket var tilsynelatende nok til at sementblandingen ikke fikk herdet før den ble vasket ut av pelen. Det ble besluttet å støpe en sementplugg på nytt 14. desember, men med dobbelt mengde sement (40 liter) og seigere sementblanding (lavere vann/sement tall).



Figur 4-8: Ny måling av vannmengde 15. desember. Vannet var grumsete med partikler, lys brun i fargen. Strømmet jevnt over rørkanten, men med ca. 10 % høyere rate enn for gårdsdagen, tilsvarende ca. 0,61 liter/min.

Kontroll påfølgende dag viset fortsatt lekkasje og denne gangen var vannet grumsete med partikler, lys brun i fargen (Figur 4-8). Vannet strømmet fortsatt jevnt over rørkanten og ny måling av vannmengde viste ca. 10 % høyere rate, tilsvarende ca. 0,61 liter/min. Økt vannmengde ble sett i sammenheng med mye nedbøren denne dagen.



Figur 4-9: Kvelden 15. desember ble det blåst opp "fender ballonger" i rørene. Disse stoppet strømmingen. Blå tusj markerte plasseringen ved installasjon. Ny kontroll viste ingen forflytning dagen etter.

Det ble besluttet å støpe på nytt samme kveld, med 60 liter sement og toppen av pelene skulle tettes med en fenderblåse for å hindre utvasking og gjennomstrømning før herding (Figur 4-9). Dette fungerte godt og den lille pelen ble omsider tett, men den store sementmengden gjorde imidlertid at sementpluggen fyller nesten 5 meter av den nedre rørlengden. Etter omfattende trykktesting og spyletesting sommeren 2022 ble den lille pelen bekreftet tett og var klar for termisk testing.

Det viste seg imidlertid siden at den store pelen heller ikke var tett, til tross for at det ikke kom vann opp fra pelen. Gjentatt runder med spyletesting og trykksetting i løpet av sommeren 2022 viste at leire samlet seg i bunnen av pelen (Figur 4-10). Dette ble rensset ut gjentatte ganger med vannspyling over perioder på 8 – 24 timers varighet, til vannets farge var klart og partikkelfritt. Til tross for rensingen viste påfølgende dager/uker etterpå at pelen igjen var fylt med 4 – 5 meter med leire i bunnen. Det ble til slutt funnet en svakhet i pelens stålvegg ved ca. 12 – 13 meters dyp som lakk vann og leire. Antakelig var dette en svak sveiseskjøt mellom to rørdeler som ikke ble tilstrekkelig tett under installasjon. Pelen kunne dermed ikke trykksettes for termisk testing.



Figur 4-10: Spyling av stor pel sommeren 2022. Ca. 4-5 meter av pelen var fylt opp med leire og silt og hindret tilkobling til TRT-riggen for termisk testing. Gjennom-spyling med vann i 10 timer rensset ut dette, men over tid ble pelen på nytt fylt opp med leire. En lekkasje ble senere oppdaget i en av sveise-skjøtene.

Pelene bar også preg av lettere overflatekorrosjon, noe som gjorde at små rustpartikler fulgte med vannet under spyling. Denne typen rustpartikler vil potensielt kunne være et problem ved at de kan tette igjen ulike deler et energisystem, slik som rør, pumper og

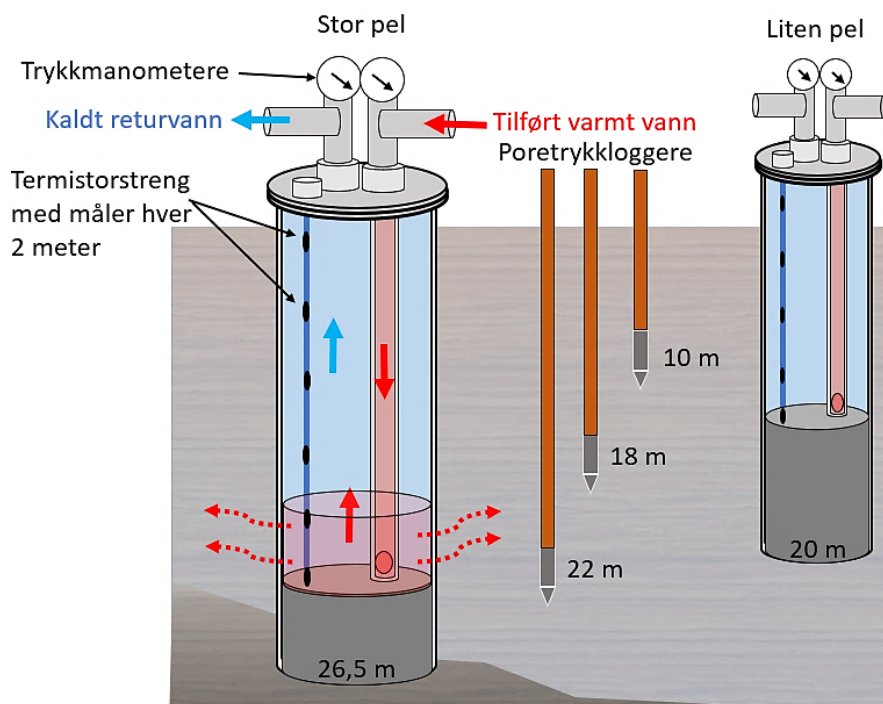
varmevekslere. En alternativ designløsning hvor vannet skilles fra stålveggen med en gummimembran kan være en fordel og bør testes ut ved en senere anledning.

4.3 Instrumentering, isolering og overvåkning

Pelene ble instrumentert med temperaturfølere og trykkloggere for å overvåke endringer over tid (Figur 4-11). For å overvåke pelenes tetthet mot lekkasje ble både innløp og utløpet av pelene instrumentert med et hydraulisk-manometer (TESS 63 mm 0-4 bar CL1.6). Opprinnelig plan var å teste pelene ved 3.0 bar statisk trykk, målt ved toppen av lokket. Manometrene gjorde det da også mulig å måle hydrauliske trykkfall ved gjennomstrømning ved å indikere trykkdifferansen (ΔP) inn og ut av pelen under TRT-testing. Manometrene måtte leses av manuelt ved testing.

Pelenes temperatur langs peleveggen ble målt i ulike dybdenivåer ved hjelp av en RST Instruments 3000 Ω Termistorstreng (RST TS5740_EL380013P med presisjonsnivå ± 0.1 °C) med måleenheter montert ved hver andre meter langs kabelstrengen. Første målepunkt var installert i bunnen av pelene og resterende enheter ble da fordelt opp til pelelokket. For den store pelen ble det benyttet 13 målepunkter, mens i den lille pelen ble det benyttet 8 målepunkter (Figur 4-11). Temperaturen ble logget hver 4 time utenom testperiodene.

For å redusere påvirkning av variasjon i døgn temperaturer på pelenes temperatur-responser ble pelene isolert med 2 lag Armaflex 18 mm cellegummi (totalt 36 mm tykkelse) samt overtrukket med heldekkende diffusjonstett plast. Rørføringene til og fra pelene ble isolert med ett lag med Armaflex 25 mm cellegummi (Figur 4-12).



Figur 4-11: Prinsipiell skisse over instrumenterings- og overvåkingsprogrammet.

Løsmassene omkring pelene ble overvåket av tre poretrykkloggere, installert ved henholdsvis 22-meters, 18-meters og 10-meters dyp under terreng (Figur 4-12). Poretrykksensorene var av typen GeoKon (GeoKon 4500DP-1-1MPa ved 22 meter og 4500DP-1-0.7 MPa ved 18-meter og 10-meter). Disse poretrykkloggerne overvåker trykkendringer i grunnvannet og temperatur-endringer i leiren ved henholdsvis de dypene de er installert. Poretrykk og temperatur ble logget hver fjerde time.



Figur 4-12: Klargjøring av pelene for TRT-testing sommeren 2022.

Å overvåke forskyvning av pelens høyde over terrengnivå som følge av temperatur-
endringer skulle etter planen gjøres ved hjelp av differensiell nivellering, via fastpunkt
som referansemål og gjentakende målinger av et gitt punkt på pelenes lokk. Problemer
med å få gjennomført de termiske testene med tilstrekkelig høy temperatur gjorde
imidlertid at dette ikke ble gjennomført i praksis. Stadige terrenginngrep omkring pelene
som følge av byggeaktiviteten på tomten gjorde også at det ble ansett som vanskelig å
skille ut termiske responser fra responser som følge av graving og fylling.

5 Termisk respons tester (TRT)

Innen grunnvarmefaget er det vanlig å benytte Termisk Respons Tester (TRT) for å kvantifisere en energibrønns ytelse og brønnens termiske respons ved temperatur-endringer. Testmetodikken ble utviklet på midten av 90-tallet (Gehlin, 1998) og det foreligger en mengde litteratur som forklarer konseptet. Innen litteraturen for energipeler er det imidlertid en blanding av ulike testmetoder og testvarianter som presenteres og dette gjør at det ikke alltid er like enkelt å sammenligne ulike peler ytelse opp mot hverandre. Det er valgt å benytte en forenklet TRT metode på BEAR pelene. En begrunnelse for dette, samt en kort oppsummering av konvensjonelle TRT metoder og av benyttet testmetode gis her.

5.1 Konvensjonell TRT

Konvensjonelle TRT-forsøk er opprinnelig utviklet for å vurdere den termiske responsen til energibrønner i berg. Ved konvensjonelle TRT-forsøk er hensikten å kartlegge både energibrønnens ytelse, samt den omkringliggende bergmassens varmeledningsevne og brønnens uforstyrrede middeltemperatur. Disse parameterne benyttes således videre i dimensjoneringen av grunnvarmeanlegget og er vesentlig for å fastsette optimal boreddybde og endelig antall energibrønner som er nødvendig for varmpumpesystemet. For detaljer om TRT-tester og bruk av data i slike analyser henvises det til litteraturen, f.eks. Gehlin (1998) eller Gustafsson & Westerlund (2010).

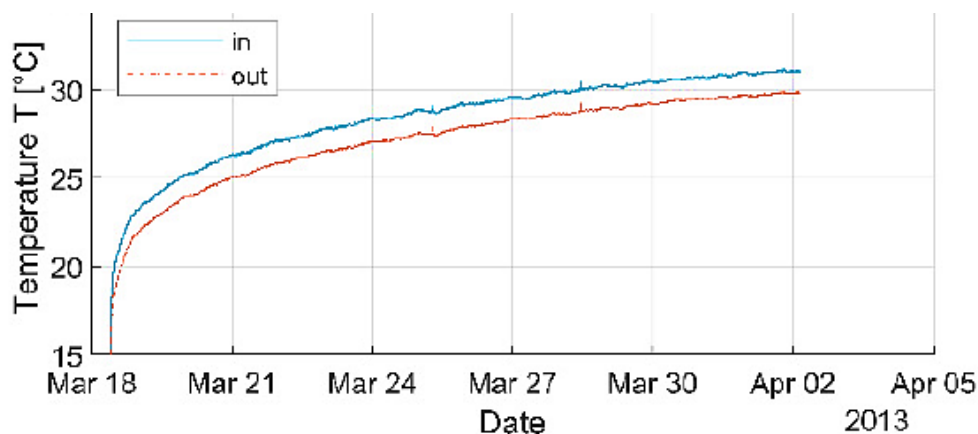
I et TRT-forsøk etterlignes en vanlig operasjonell drift av brønnen, men driften er kontrollert til å følge et gitt forløp. Brønnens kollektor kobles til en mobil TRT-rigg som sirkulerer vann/glykol-vann gjennom røret. Den vanligste testutrustning benytter varmetilførsel, hvor brønnen tilføres oppvarmet vann/glykol-vann via en el-kjel som er montert på den mobile hengeren (Figur 4-12). Testen foregår ved at brønnen tilføres varme ved en gitt termisk effekt (kW), gjerne mellom 3, 6, 9 eller 12 kW, over en periode på 48-72 timer (2-3 dager). Den termiske effekten kontrolleres ved at el-kjelen settes ved et fast pådrag (P - kW) og at sirkulasjonsraten av vann/glykol-vann (ρC_p) gjennom kollektoren holdes konstant (Q - l/s), typisk en rate mellom 0.5 – 1.0 l/s. Fra den mobile hengeren blir dette overvåket ved å måle og beregne parameterne i ligning 1.

$$P = \rho C_p \cdot Q \cdot \Delta T \quad \text{hvor} \quad \Delta T = (T_{inn} - T_{ut}) \quad (1)$$

Ved å benytte et gitt effektpådrag (P - kW) og konstant sirkulasjonsrate (Q) vil temperaturforskjellen (ΔT) mellom inngående (T_{inn}) og utgående (T_{ut}) væsketemperatur også forholdes konstant, typisk mellom 3°C til 7°C, men ettersom brønnen varmes opp vil både inngående og utgående væsketemperatur øke. De overnevnte parametene måles og loggføres jevnlig (hvert 5-10 minutt) i løpet av testen.

Til forskjell fra energibrønner er energipeler mindre egnet til å testes med samme TRT-utstyr som benyttes i energibrønnene. Dette kommer av at pelene gjerne er betydelig kortere og ikke kan testes ved samme effekt uten at pelen blir svært fort varm ved de

samme testbetingelsene. Resultatet fra et konvensjonelt TRT-forsøk på en energipeler vil kunne plote som i Figur 5-1. Her er testen gjort på en 31-meter lang plasstøpt pel i England over en periode på 15 dager. Opprinnelig midlere temperatur i pelen før test var $14,2^{\circ}\text{C}$. Det ble benyttet vann som sirkulasjonsvæske, ved $P = 1.69 \text{ kW}$ og $Q = 0.32 \text{ l/s}$. Selv ved disse lave effekt- og sirkulasjons-ratene økte temperaturen forholdsvis fort til $>25^{\circ}\text{C}$.



Figur 5-1: Konvensjonell TRT-test av en 31-meter lang energipel i England over en periode på 15 dager. Opprinnelig midlere temperatur i pel før test var $14,2^{\circ}\text{C}$. Benyttet vann som sirkulasjonsvæske, ved $P = 1.69 \text{ kW}$ og $Q = 0.32 \text{ l/s}$ (Maragna & Loveridge, 2021).

BEAR-pelene er kortere enn denne pelen til Maragna & Loveridge (2021), noe som tilsier at TRT-forsøket bør gjennomføres ved enda lavere rater for å kunne sammenlignes. Samtidig er det ønskelig å holde pelens temperatur under 30°C av hensyn til stålets ekspansjon. NGIs TRT-rigg er imidlertid konstruert med 3 kW som nedre effektnivå og det viste seg at riggen ikke var mulig å tilpasses til det testregime som begrenses av pelene. Samtidig viste spyleforsøk av den store pelen at det forekom en lekkasje av leire og grunnvann inn i pelen. Denne lekkasjen var liten, men gjorde uansett at pelen ikke kan trykkes til 3 bar og kobles til TRT-riggen. I sum ble det derfor besluttet å foreta et forenklet TRT-forsøk for begge BEAR-pelene slik at de kan sammenlignes seg imellom og opp mot tilsvarende forsøk som er tilgjengelig i annen faglitteratur.

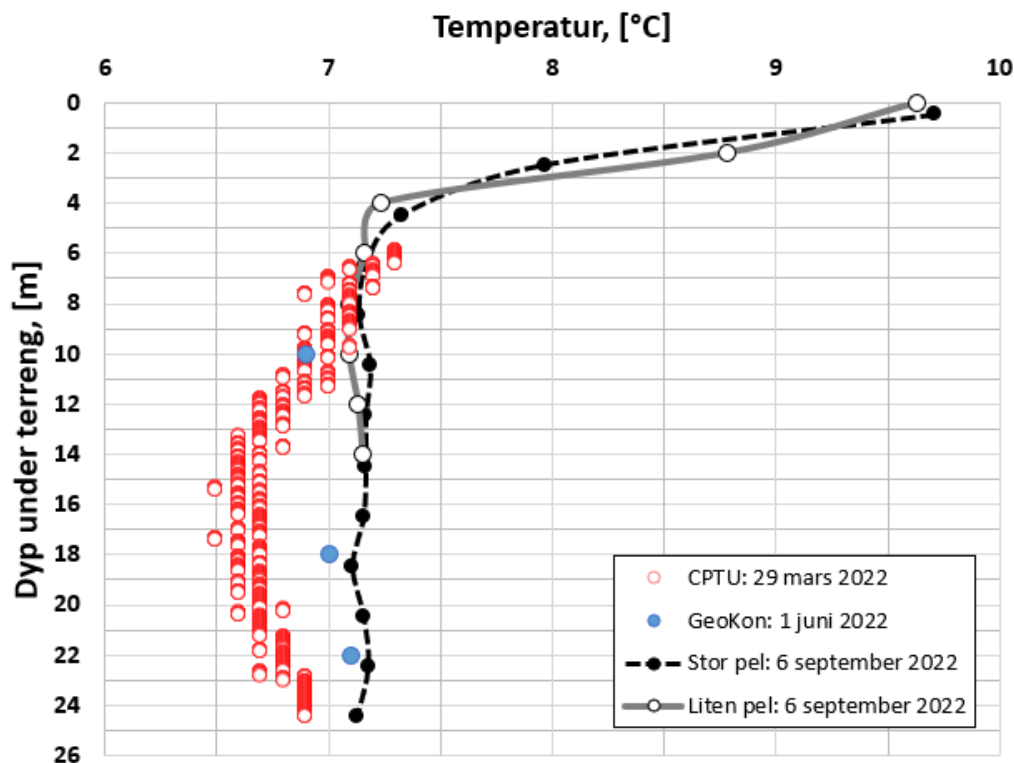
5.2 Forenklet TRT

I et forenklet TRT-forsøk foregår testen forholdsvis likt, ved at sirkulasjonen av vann/glykol-vann (ρC_p) gjennom pelen holdes konstant ($Q - \text{l/s}$), men og at pelen tilføres varme eller kulde ved en fast tilført temperatur (T_{inn}) over en gitt periode, typisk 24 timer. Den termiske effekten ($P - \text{kW}$) kontrolleres dermed ikke og vil avta gjennom forsøksperioden. Temperatur-forskjellen (ΔT) er heller ikke konstant, men avtar ettersom brønnen varmes opp til T_{inn} -nivået. Fordelen ved å benytte en slik forenklet test er at en øvre grense for temperatur kan bestemmes på forhånd, samt at pelene ikke må trykkes. Det imidlertid nødvendig å benytte en numerisk modell for å beregne varmeledningsparameterne.

6 Resultater

I forkant av TRT-forsøkene viser termistordataene fra pelene at den opprinnelige temperaturen i løsmassene er nokså stabil og upåvirket av årstidsvariasjoner i løsmassene som ligger 4-5 meter eller dypere (Figur 6-1). Den gjennomsnittlige temperaturen i både den lille pelen og den store pelen er ca. 7,1°C for løsmassene under dette nivået. Dette stemmer nokså bra med 10 års gjennomsnittlig årstidsvariasjon i lufttemperatur på 7,0°C registrert av nærmeste værstasjon SN69020 ved Ranheim (Meteorologisk Institutt). I øvre del av jordprofilen varierer temperaturen over året og for denne måleserien øker temperaturen forholdsvis raskt til 9,7°C ved terrengnivå.

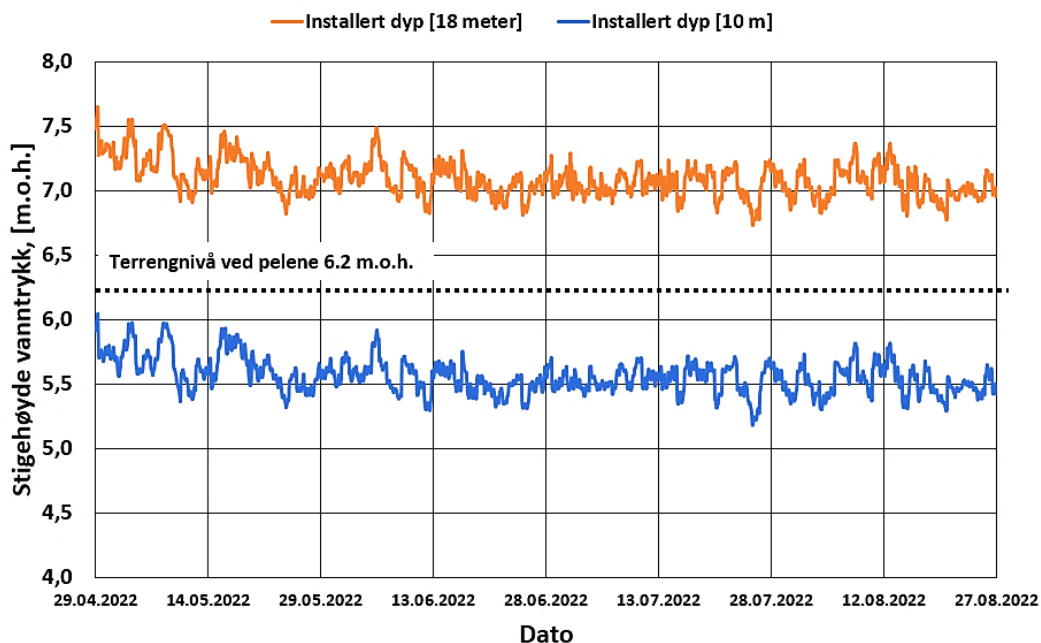
Den delen av til jordprofilen som er påvirket av årstidsvariasjonen dekker en relativt større andel av den lille pelens lengde enn den store pelen. For den lille pelen utgjør de 4-5 øverste meterne i overkant av 28 % av pelens totale "tanklengde" (14,2 meter er vannfylt under bakken). For den store pelen utgjør dette i overkant av 15 % av pelens "tanklengde" (26 meter er vannfylt under bakken). Til sammenligning vil dette for en 250-meter dyp energibrønn i berg med tilsvarende del påvirket lengde typisk utgjøre mindre enn 2 % av brønnens lengde. Temperaturvariasjonene som vist i Figur 6-1 vil følgelig ha større innvirkning på den termiske responsen i en pel enn i en brønn. Under testing med varmetilførsel vil spesielt øvre deler av pelen gi mindre bidrag fordi de øverste 4-5 meterne med løsmasser vil ha mindre temperaturforskjell til vannet enn de dypere liggende løsmassene. Dette er i utgangspunktet kun et problem for feltforsøk, mens peler som stått under et bygg med isolert såle ikke vil ha slike variasjoner.



Figur 6-1: Uforstyrret temperaturprofil i løsmassene før TRT-forsøk 6. September 2022.

Poretrykket i umiddelbar nærhet til pelene er vist i Figur 6-2 for perioden april – september 2022. Etter installasjon ble det påvist et brudd i signalet til den sensoren som står ved 22-meters dyp. Denne sensoren er derfor ikke vist i figuren. Over perioden viser sensorene at poretrykket er relativt stabilt over sommeren, men med mindre trykkfluktuasjoner i størrelsesorden 0 – 0,6 meter (0 – 6 kPa) for både 10- og 18-meters loggeren.

Det fremgår av Figur 6-2 at det er et svakt artesisk trykk ved 18-meters sensoren, hvis trykknivå ligger ca. 0,5 – 1,5 meter over terrengnivå. Dette trykket avtar høyere i jordprofilen og ved 10-meters sensoren er det artesiske trykket utlignet og ligger ca. 0,5-1,5 meter under terrengnivå. Dette stemmer forholdsvis bra med de tidligere rapporterte målinger (NGI, 2020a) og med vannlekkasjene som inntraff i pelene før de ble tettet skikkelig med sement.

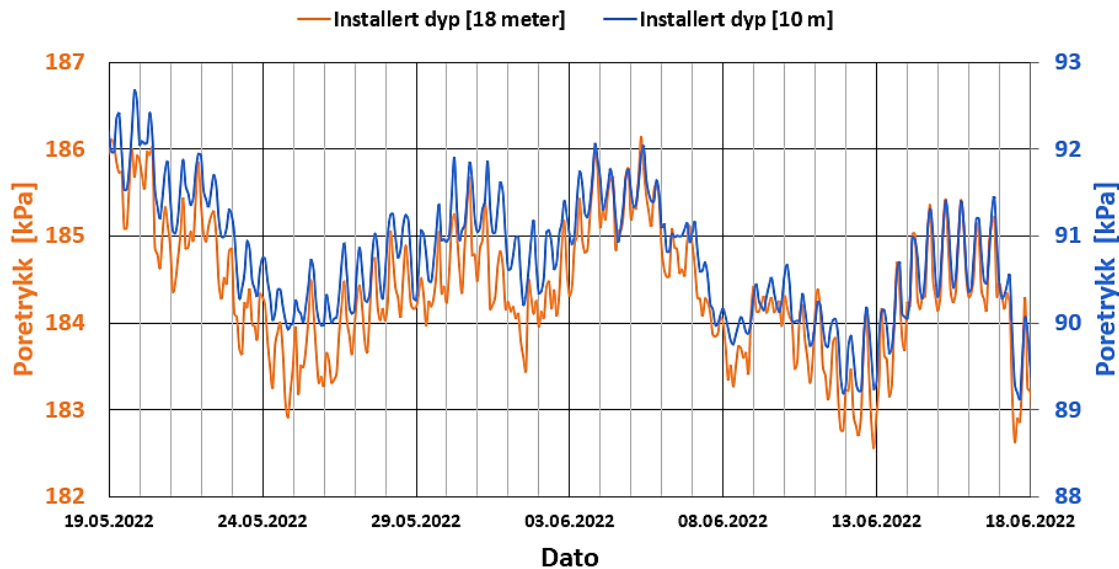


Figur 6-2: Målt poretrykk i løsmassene ved henholdsvis 10 meter og 18 meters dyp.

I perioden juli - oktober 2022 foregikk det en rekke grave- og byggeaktiviteter på tomten, men dette har ikke gitt synlige utslag på poretrykket i denne tidsserien. Pelene ble i samme periode spylt rene ved flere anledninger og tilført vann ved 10 – 15°C, høyere temperaturer enn in situ temperaturen i løsmassene. Dette har ikke gitt merkbare utslag på poretrykket utover de naturlige poretrykkfluktuasjonene.

Daglige poretrykkvariasjoner ligger i størrelsesorden 1,0 kPa og sees i sammenheng med flo/fjære-syklusen i Trondheimsfjorden (Figur 6-3). Numeriske analyser gjort av Adinolfi et al. (2018) viser at temperaturinduserte poretrykkvariasjoner vil kunne forekomme i nærheten av energipeler. Ved moderate temperaturendringer i jordprofilen ($\Delta T < 12^\circ\text{C}$) viser modellene svært beskjedene endringer i poretrykk, i størrelsesorden $< 0,1$ kPa. Dette er såpass små endringer at de naturlige døgnvariasjonene i Saksvik

overskygger eventuelle forandringer forårsaket av pelene. Dette er antakelig grunnen til at poretrykkendringer som følge av TRT-forsøkene ($\Delta T < 8^\circ\text{C}$) ikke har lat seg registrere i BEAR-prosjektet.



Figur 6-3: Døgnvariasjoner i poretrykk ved henholdsvis 10 meter og 18 meters dyp.

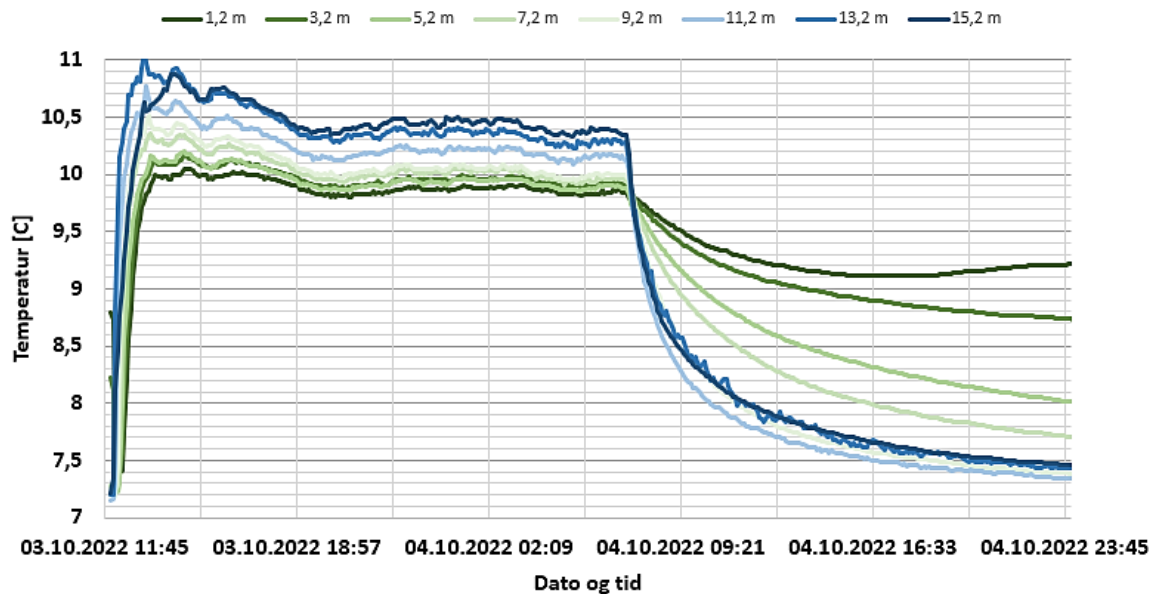
6.1 Termiske responser

De forenklede TRT-forsøkene er gjennomført i løpet av september og oktober 2022. Vanntilførselen kommer fra en tappekran på brakkeriggen i nærheten. Vanntilførselen var stabil, men noe temperaturvariasjon forekom på grunn av lang slangeledning fra kranen til pelen. Temperaturen svingte spesielt tydelig på testen i oktober, som gikk over natten (ca. 19 timer), mens kun mindre endringer forekom på testen i september som gikk på dagtid (ca. 10 timer).

6.1.1 Liten energipel

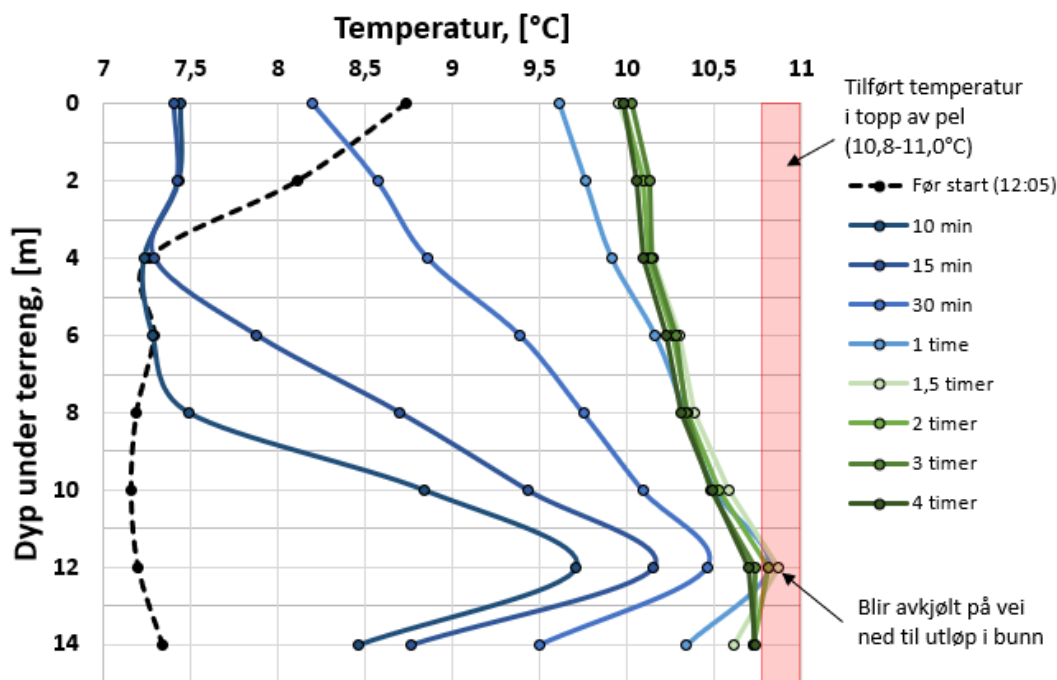
Termiske respons i den lille energipelen ($\text{Ø}139,7 \text{ mm}$) er vist i Figur 6-4 for TRT-testen kl. 12:05 den 3. oktober til 07:20 den 4. oktober 2022. Testens varighet er totalt 19 timer og 15 minutter med tilføring av varme, mens "recovery-perioden" går over flere dager etter dette. Pelen blir tilført tappevann ved $10,4 - 11,0^\circ\text{C}$ fra en kran med $6,1 \text{ l/min}$ kontinuerlig sirkulasjonsrate.

Utsnitt av ulike tidsintervaller fra testen er vist i Figur 6-5 og Figur 6-6 med henvisning til henholdsvis tid etter oppstart og avstengning av varmetilførselen. Temperaturen i pelen før oppstart av testen viste en noe høyere temperatur i øvre del av pelen, med $8,8^\circ\text{C}$ ved ca. 0,1 meters dyp (under terreng), men med en stabil gradient ved ca. 4,0 meters dyp og videre ned mot 14 meters dyp med temperatur på ca. $7,2^\circ\text{C}$.



Figur 6-4: TRT av den lille pelen 3-4 Oktober 2022. Vannet ble tilført ved 10,4 – 11,0 °C med kontinuerlig sirkulasjon av 6,1 l/min i 19 timer (kl. 12:05 den 3. oktober – 07:27 den 4. oktober).

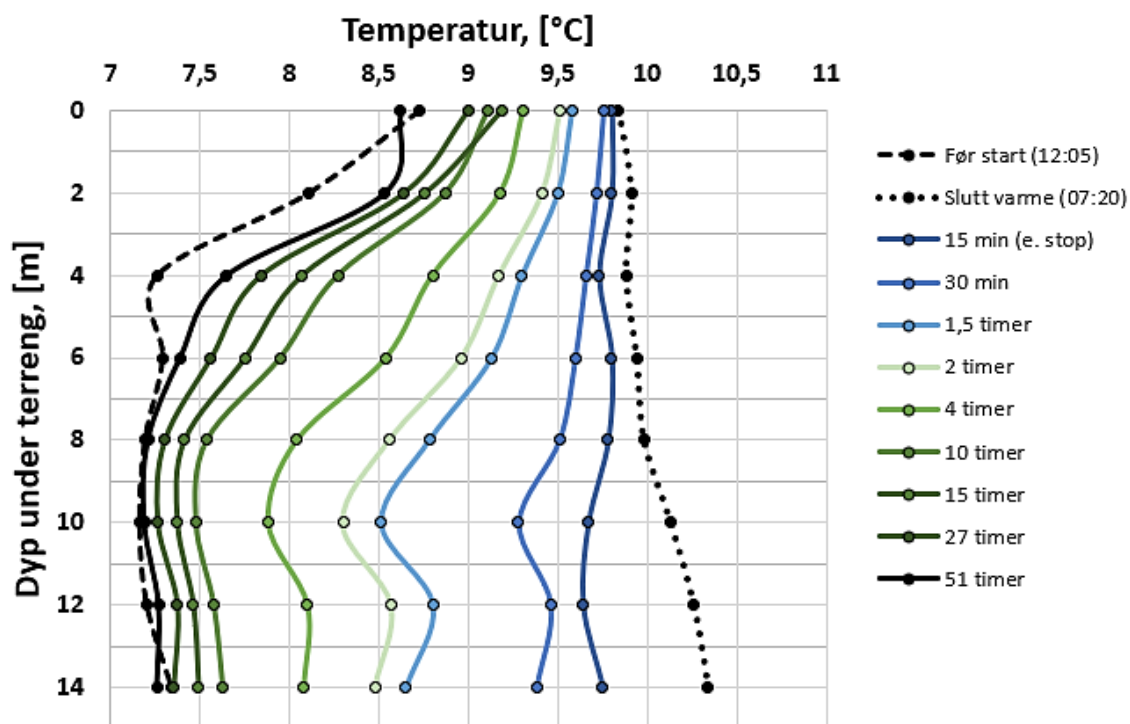
Ved tilførsel av 6,1 liter vann per minutt vil en full utskiftning av pelens vannvolum (205 liter) skje innen 31 minutter. I snitt vil utskiftningsfronten forplantes oppover i pelen med en hastighet på 0,5 meter per minutt. Dette forløpet gjenspeiles relativt tydelig av hvordan temperaturen øker i pelen og Figur 6-5 viser at utskiftningsfronten har beveget seg fra ca. 14 meters dyp til 8 meter ca. 10 minutter inn i testen, og videre fra 8 meter til 4 meter etter 15 minutter inn i testen.



Figur 6-5: Temperatur ved gitte tidsintervaller i liten energipel under oppvarming med tappevann fra kran. Vannet tilføres i bunnen av pelen og presses opp mot overflaten.

Tappevannet avgir varme til omgivelsene ettersom det sirkuleres opp mot uttaket i toppen. Temperaturendringen i pelen viser en forsinkelse i respons hvor utgangstemperaturen i toppen av pelen er forholdsvis lav og først er tilnærmet stabil etter 1,5 timer med sirkulasjon. Dette betyr at ca. 3 ganger pelens vannvolum må byttes ut før temperaturen stabiliseres. Etter ca. 1,5 timer er temperaturvariasjonen relativt stabil og vannet kjøles ned ca. $\Delta T = 0,73 \text{ }^\circ\text{C}$ på tiden fra innløp i bunn av pelen til utløp i topp av pelen. Dette forholdet vedvarer de neste 4 timene, men synker til $\Delta T = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ utover testen, antakelig delvis som følge av noe lavere temperatur på tappevannet utover kvelden og natten.

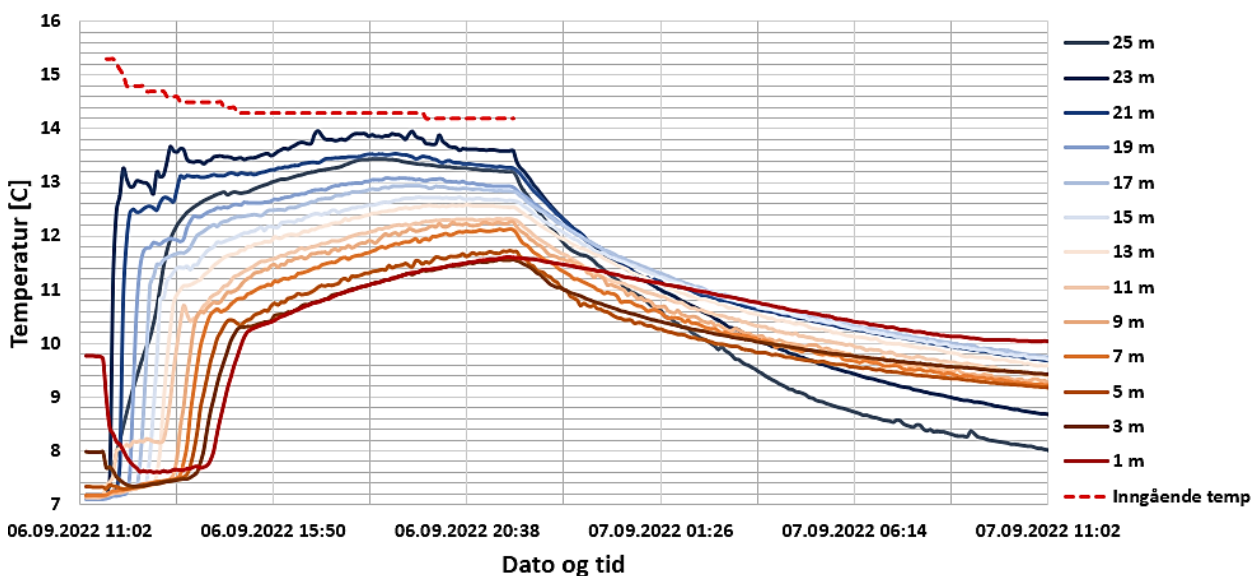
Varmetilførselen avsluttes etter 19 timer og 15 minutter og sirkulasjon av tappevann stoppes. Figur 6-6 viser at temperaturen i pelen avtar ettersom vannet i pelen avgir overskuddsvarme. Det er spesielt hurtig nedkjøling mellom 10 – 11 meters dyp, noe som tyder på at det er en bedre varmeoverføring i dette området i løsmassene. En slik variasjon kan for eksempel skyldes at det forekommer vannstrømning i et vannførende løsmassesjikt i dette dypet, noe som kan se ut for å stemme med CPTU og totalsonderingen. Etter 15 timer med sees det at temperaturen i pelen nesten har gått tilbake til opprinnelig nivå og grafen følger den samme formen som før testen startet, men med en økning på ca. $0,1\text{-}0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ i forhold til opprinnelig temperatur. Etter ca. 50 timer er temperaturen i pelen tilnærmet tilbake til opprinnelig nivå som før testen startet, spesielt tydelig i datasettet til "51 timer" mellom 6-14 meters dyp i Figur 6-6.



Figur 6-6: Temperaturutvikling ("recovery"-periode over natten 7. september 2022) i liten energipel etter at 19 timer med oppvarming er gjennomført 3-4. oktober 2022.

6.1.2 Stor energipel

Termiske respons i den store energipelen (Ø323 mm) er vist i Figur 6-7 for TRT-testen kl. 11:37 – 21:47 den 6. september 2022. Testens varighet er totalt 10 timer og 10 minutter med tilføring av varme, mens "recovery-perioden" går over en periode på 15 timer etter dette. Pelen blir tilført tappevann ved 14,1 – 14,5 °C fra kran med 10,5 l/min kontinuerlig sirkulasjonsrate.



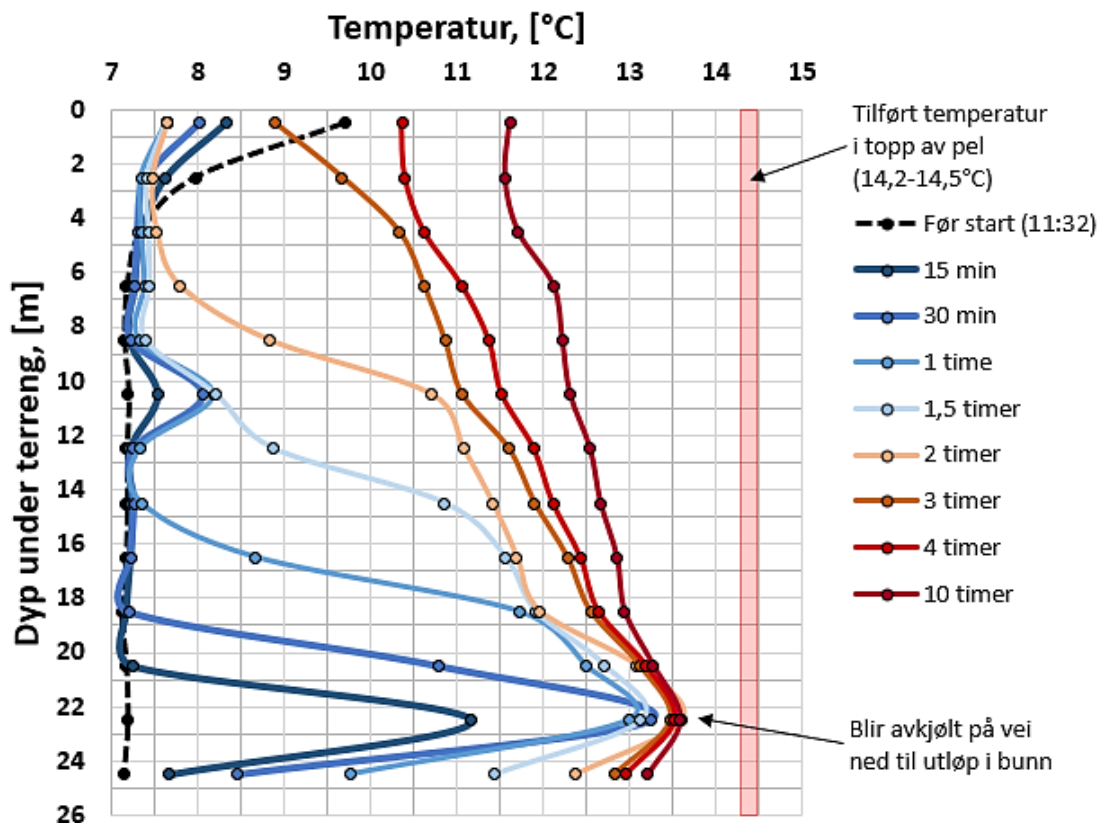
Figur 6-7: TRT av den store pelen 6. september 2022. Vannet ble tilført ved 14,1 – 14,5 °C med kontinuerlig sirkulasjon med 10,5 l/min i 10 timer.

Utsnitt av ulike tidsintervaller fra testen er vist i Figur 6-8 og Figur 6-9 med henvisning til henholdsvis tid etter oppstart og avstengning av varmetilførselen. På samme vis som for den lille pelen viser temperaturen i den store pelen en noe høyere temperatur i øvre del av pelen før oppstart av testen, med 9,8 °C ved ca. 0,5 meters dyp (under terreng), men med en stabil gradient ved ca. 4,5 meters dyp og ned mot berg med 7,2 °C. Dette er noe høyere temperatur i toppen av pelen enn for testen i oktober, men den stabile temperaturen under 4,5 meters dyp er lik som for testen av den lille pelen.

Ved tilførsel av 10,5 liter vann per minutt vil en full utskiftning av pelens vannvolum (2026 liter) skje innen 3 timer og 13 minutter. I snitt vil utskiftningsfronten forplantes oppover i pelen med en hastighet på 0,13 meter per minutt. Dette forløpet gjenspeiles relativt tydelig av hvordan temperaturen øker i pelen og Figur 6-8 viser at utskiftningsfronten har beveget seg fra ca. 26 meters dyp til 14 meter ca. 1 time inn i testen, og videre fra 14 meter til 6 meter etter 2 timer inn i testen. Dette er en noe raskere respons enn hva snitthastigheten tilsier.

Temperaturendringen i pelen viser en forsinkelse i respons hvor utgangstemperaturen i toppen av pelen er forholdsvis lav gjennom hele testen. Etter 10 timer er fortsatt utgående temperatur i fra toppen av pelen ikke stabilisert. Etter 10 timer sirkulasjon er

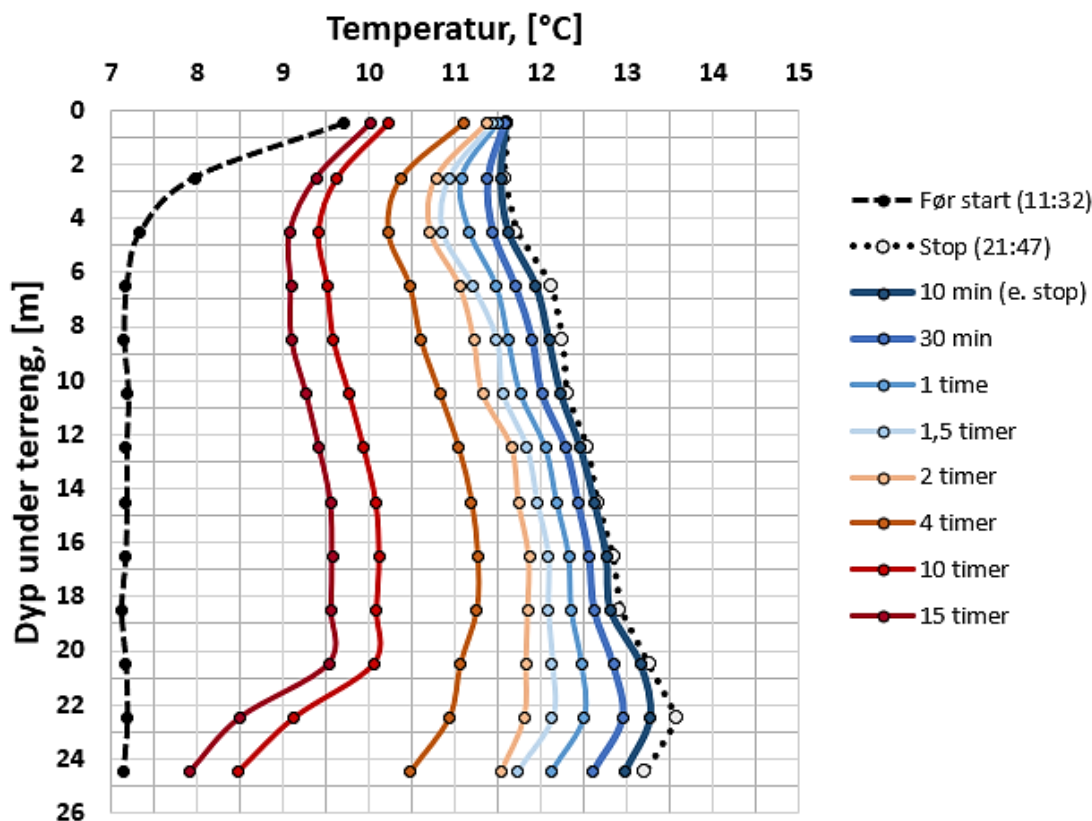
ca. 3 ganger pelens vannvolum byttet ut (6300 liter), men temperaturen er ikke stabilisert. Dette kommer antakelig av at sirkulasjonsraten er forholdsvis lav i forhold til pelens totale vannvolum.



Figur 6-8: Temperaturutvikling i stor energipel under oppvarming (kjøledrift) med tappevann fra kran 6. september 2022. Vannet ble tilført ved 14,2 – 14,5 °C med kontinuerlig sirkulasjon med 10,5 l/min i 10 timer.

Temperaturen i pelen avviker fra forventet respons ved ca. 11 meters dyp. Umiddelbart etter oppstart av testen (15 min) sees en økning i temperatur på ca. 0,3 °C i dette området, selv om det ikke tilføres noe vann her. Dette kommer antakelig av at det er et lite brudd i sveiseskjøten ved ca. 11,5 meter, mellom to rørelementer, som muliggjør innlekkasje av vann og leire med noe høyere temperatur.

Varmetilførselen avsluttes etter 10 timer og 10 minutter og sirkulasjon av tappevann stoppes. Figur 6-9 viser at temperaturen i pelen avtar ettersom vannet i pelen avgir overskuddsvarme. Det er spesielt hurtig nedkjøling i nedre del av pelen, fra 20 meters dyp og ned, noe som tyder på at det er en bedre varmeoverføring i dette området i lømassene. En slik variasjon kan for eksempel skyldes at det forekommer vannstrømning i et vannførende lag i dette dypet, noe som stemmer med CPTU og totalsonderingen. Etter 10 timer sees det at temperaturen i pelen fortsatt ligger ca. 3 °C høyere i forhold til opprinnelig temperatur i de delene av pelen som står i leire.

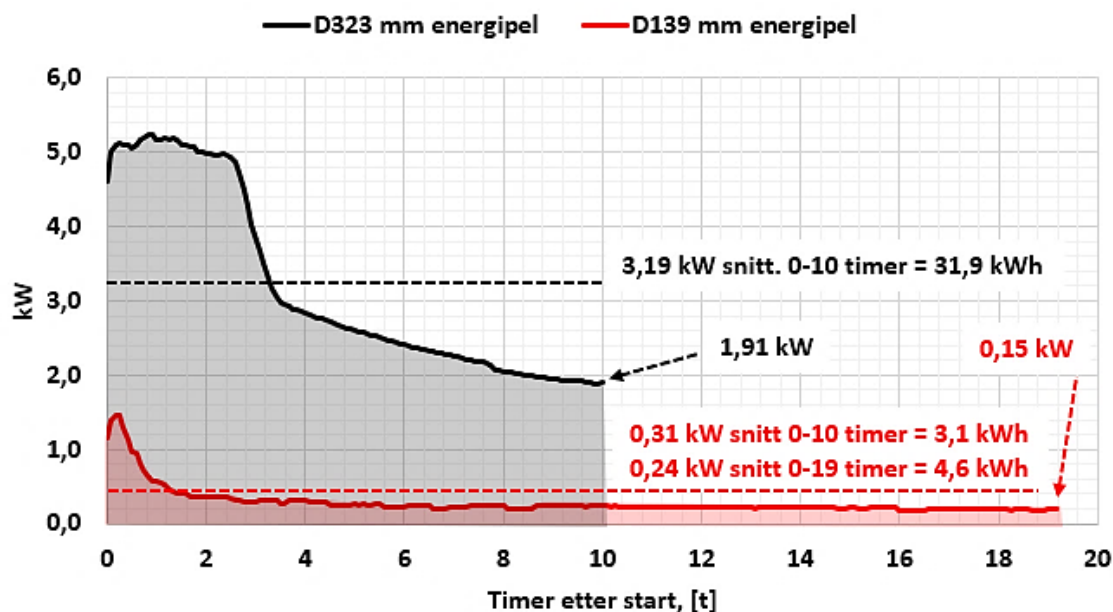


Figur 6-9: Temperaturutvikling ("recovery"-periode over natten 7. september 2022) i stor energipile etter at 10 timer med oppvarming er gjennomført 6. september 2022.

6.2 Effekt (kW) og energi (kWh) fra pelene

De termiske testene i den store (Ø323) og den lille (Ø139) pelen er gjennomført med ulike pumperater og temperatur på inngående vann. Dette gjør at effektpådraget og den termiske responsen er størst for den store pelen og testene viser følgende to ulike effekt-scenarier for pelene. Den store pelen kommer tilsynelatende bedre ut i lys av energimengder (kWh) og effektnivå (kW) hvis testene sammenstilles i samme tidsplott (Figur 6-10).

Den store pelen er totalt tilført ca. 31,9 kWh energi over en periode på 10 timer, mens den lille pelen er tilført 3,1 kWh energi i samme tidsrom, eller 4,6 kWh over hele testens forløp på 19 timer. Forskjellen i energitilførsel kommer primært av den relativt store forskjellen i utskiftbart vannvolum i pelene (2024 liter vs. 205 liter), ulik pumperate benyttet (10,5 l/min vs. 6,1 l/min), samt den høyere temperaturen på tilførselsvannet (ca. 14,2 °C vs. ca. 10,6 °C) i henholdsvis den store og den lille pelen.



Figur 6-10: Effekt-kurver fra TRT-testene av store (Ø323) og liten (Ø139) energipel.

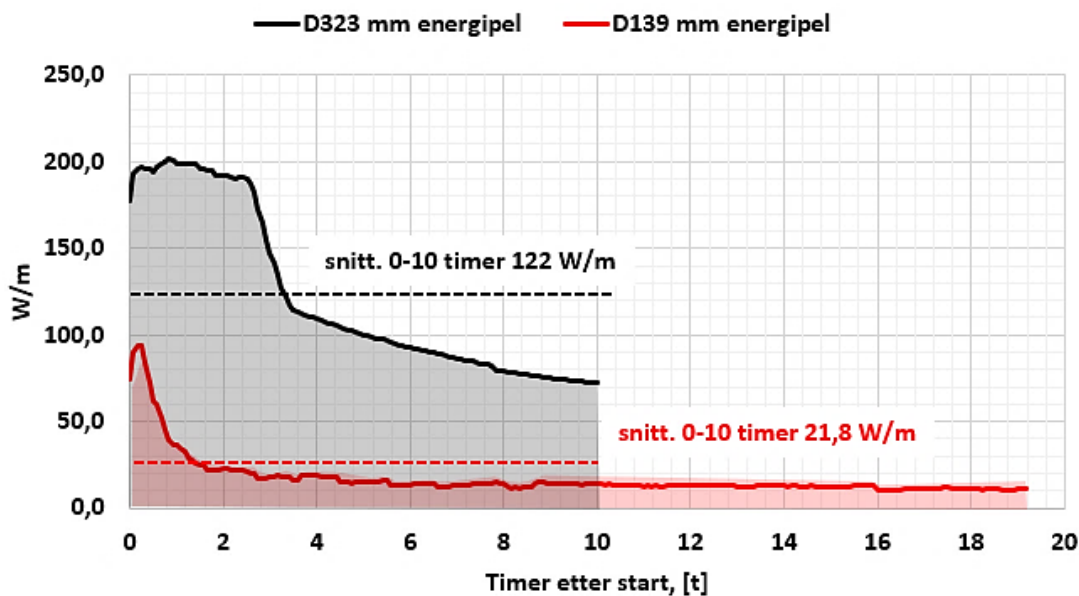
Den største forskjellen mellom pelene er først og fremst forskjellen i effekt (kW) og varighet på toppnivået av effektkurven over tid. Den store pelen oppnår vesentlig større effekt med ca. 5,1 kW varmeoverføring over en periode på ca. 3 timer i starten av testen. Dette tidsrommet tilsvarer hovedsakelig den tiden hvor det opprinnelige 2024 liter vannvolumet blir byttet ut med nytt vann. Tilsvarende periode for den lille pelen er kun 0,5 timer hvor pelen oppnår en effekt på ca. 1,3 kW i en kort del av testen.

Etter utskiftning av det første vannvolumet inntreer en periode hvor vannets temperatur gradvis øker ettersom varme fra omgivelsene blir adaptert til den inngående vanntemperaturen på vannet som tilføres i bunnen av pelene. Denne perioden virker tilsynelatende å vare i ytterligere ca. 2 vannvolum, som tilsvarer 1,5 timer for den lille pelen og ca. 9 timer for den store pelen. I denne initiale perioden har pelenes effektkurver et bratt avtakende kurveforløp.

Etter den initiale perioden opptrer en tilnærmet stabil varmeoverføringsperiode hvor effekten til varmeoverføringen i all hovedsak styres av den termiske overførings-hastigheten fra stålveggene og videre til løsmassene omkring pelene. I denne perioden avtar effekten gradvis, men forholdsvis sakte. Dette er mest åpenbart i effektkurven til den lille pelen, hvor effekten er relativt stabil fra 2 – 19 timer, dog på et relativt lavt nivå mellom 0,20-0,15 kW for pelen om helhet. For den store pelen er denne stabile trenden tilsynelatende ikke oppnådd i løpet av testen pga. pelens store vannvolum i forhold til pumperate og pelen holder fortsatt et relativt høyt effektnivå på 1,91 kW også etter 10 timer. Trenden på effektkurven indikerer at dette nivået ville ha sunket til ca. 1,75 kW etter 19 timer.

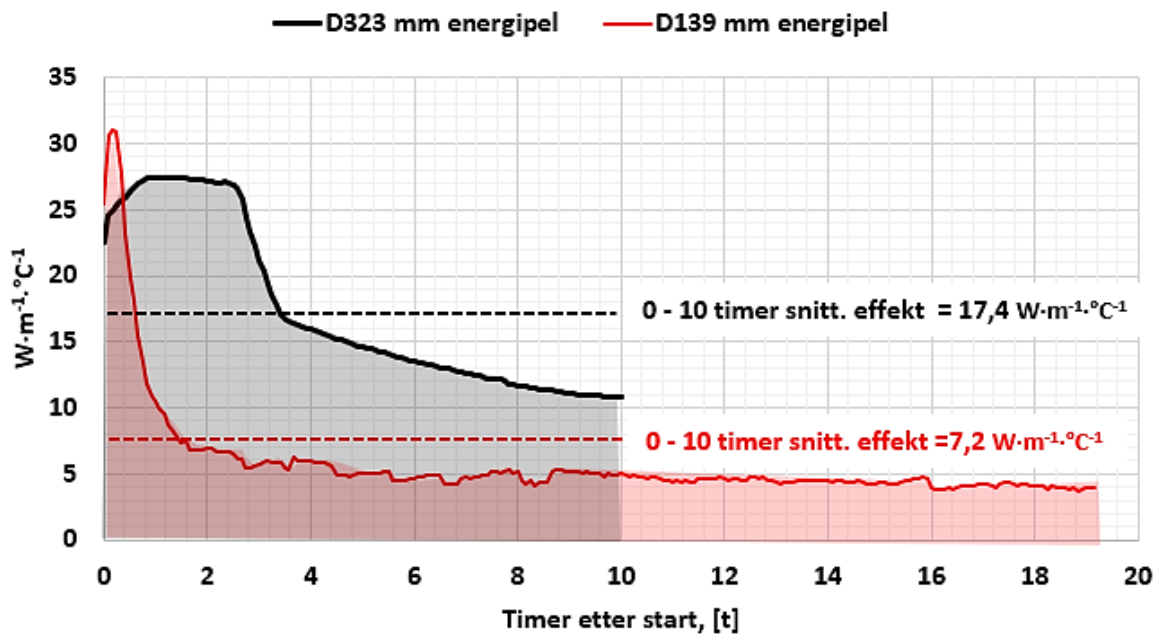
Den relativt store forskjellen i energimengde som energipelen kan absorbere og overføre til løsmassene er en funksjon av pelenes utforming og testbetingelser. For å sammen-

lige pelene må derfor dataene presenteres skalert, hvor ulikheter i pelenes effekt fordeles og vektet likt i forhold til dens størrelser og testbetingelser. En relativt vanlig måte å presentere dette på i litteraturen er å fordele effekten for hele pelen over den delen av pelens totale lengde som er i kontakt med løsmassene (W/m) (se f.eks. Laloui & Loria, 2020; Fardoun et al., 2021). Dette er henholdsvis 26 meter og 14 meter for den store og lille pelen. I Figur 6-11 viser denne skaleringen at den store pelens effekt er vesentlig større per meter pel (73,5 W/m) etter 10 timer enn for den lille pelen (14,0 W/m). Typiske tall for energipeler i andre publikasjoner er gjerne gitt til å ligge mellom 10 – 40 W/m pel (Jalaluddin et al., 2011; Laloui & Loria, 2020; Fardoun et al., 2021). Denne måten å skalere dataene på gjengir imidlertid ikke testenenes ulike utgangspunkt i forhold til inngående vanntemperatur. Effektdataene til den store pelen ser dermed uriktig fordelaktig ut med hensyn på termisk kapasitet.



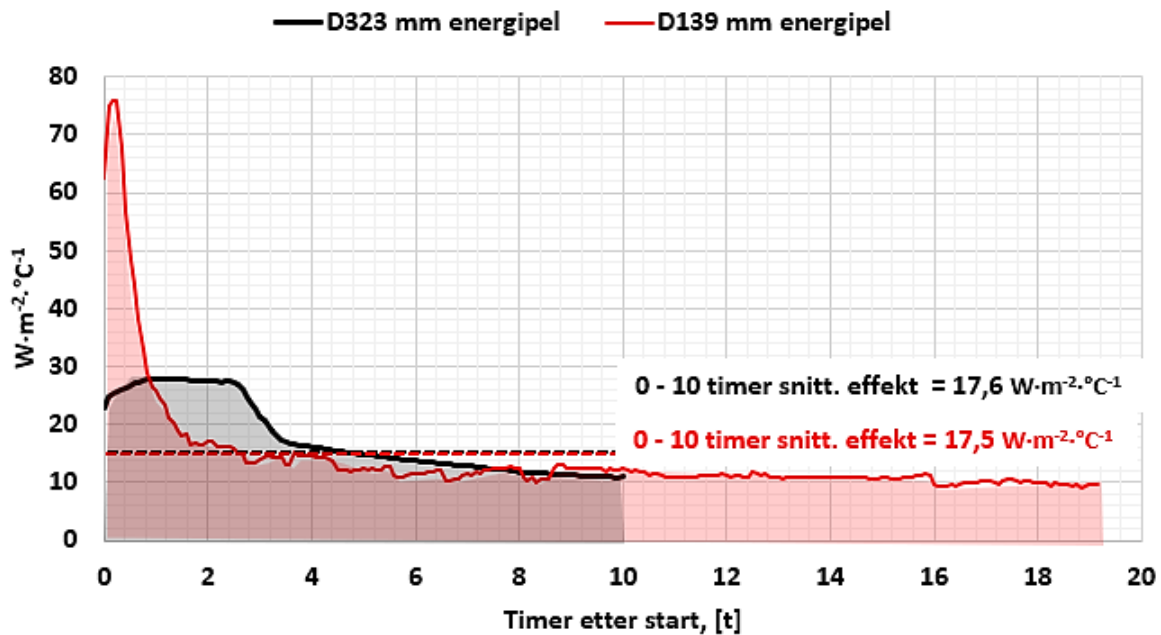
Figur 6-11: Effekt-kurver fra TRT-testene av den store (Ø323 mm) og den lille (Ø139 mm) energipelen skalert for pelengde.

I Figur 6-12 er innflytelsen av temperatur inkludert ved at den termiske effekten ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) er skalert for pelenes ulike lengder i kontakt med løsmassene, samt gjennomsnittlige økte temperatur på innløpvannet i forhold til pelens gjennomsnittlige stabile temperatur før testen (økning på $7,0^\circ C$ vs. $3,0^\circ C$ i henholdsvis stor og liten pel). Av Figur 6-12 sees at effektkurvene nå er forholdsvis overlappende i den tidlige delen av testens forløp, men at den store pelen har litt over dobbelt så stor skalert effekt over samme tidsperiode som den lille pelen, dvs. $17,4 / 7,2 = 2,4$ ganger større skalert effekt i gjennomsnitt for de 10 første timene. Dette forholdstallet (2,4) er forholdsvis likt forholdstallet mellom BEAR-pelens indre diametere \varnothing_{ID314} mm og \varnothing_{ID130} mm (forholdstall = 2,41). Det samme forholdstallet er følgelig også likt forholdstallet mellom pelens indre ståloverflateareal, som representerer pelens kontakt med vannet og overføringsveien for varmen mot leiren omkring røret.



Figur 6-12: Skalerte effekt-kurver fra TRT-testene av den store (Ø323 mm) og den lille (Ø139 mm) energipelen skalert for pelelengde og inngående temperatur på vannet.

Ved å skalere effektkurven mot pelenes indre overflateareal fås Figur 6-13 som viser at snitteffekten for begge pelene blir svært like når TRT-dataene presenteres på en måte som normaliserer ulikhetene i størrelse og testbetingelser.



Figur 6-13: Effekt-kurver for den store (Ø323 mm) og den lille (Ø139 mm) energipelen skalert for pelareal og inngående temperatur på vannet. Den noe mer hakkete form på den røde kurven kommer som følge av mindre fluktusjon i tilførte vanntemperatur under testen.

Ulike snittverdier av skalert effekt fordelt over testenenes forløp er gitt i Tabell 6-1 med referanseverdier hentet fra et lignende pilotforsøk med BSR-peler i Japan (Jalaluddin et al., 2011). Med unntak av helt tidlig i oppstartsperioden av testene er den skalerte effekten relativt lik for både den store pelen og den lille pelen. Dette sees f.eks. i perioden 0-3 timer hvor snitteffekten er $26,1 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}$ og $27,4 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}$ for henholdsvis den store og den lille pelen. Over 0-10 timers perioden er snitteffekten på $17,6 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}$ for den store pelen og $17,5 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}$ for den lille pelen, også her nokså likt for begge pelene.

Tabell 6-1: Oversikt over BEAR peler og sammenlignbare data fra tilsvarende forsøksfelt i Japan (Jalaluddin et al. 2011). Snittverdier er gitt for ulike testperioder for skalert effekt.

Tid	Ø323 mm BEAR 10,5 l/min	Ø139 mm BEAR 6,1 l/min	Ø139 mm Japan 2,0 l/min	Ø139 mm Japan 4,0 l/min	Ø139 mm Japan 8,0 l/min
[t]	$[\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}]$	$[\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}]$	$[\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}]$	$[\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}]$	$[\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}]$
0 – 3	26,8	29,3	14,3	24,8	33,1
3 – 10	13,8	12,4	10,4	13,3	14,6
0 – 10	17,6	17,5	11,3	16,0	18,5
3 – 19	-	11,4	9,4	11,8	12,3
Reynolds tall	Re = 551	Re = 815	Re = 424	Re = 849	Re = 1697

Pumperaten og strømningshastigheten vil til en viss grad medvirke til at temperaturgradient er bedre fordelt i den vannfylte delen av pelen og med dette øke varmeoverføringen. Denne trenden er dokumentert i feltforsøket i Japan, gjengitt i Tabell 6-1 etter omregning av data fra Jalaluddin et al., 2011. I tabellen sees det at den skalerte effekten øker ettersom pumpehastigheten øker fra 2 – 4 – 8 l/min. Den lille BEAR pelen er testet for 6,1 l/min og får effektverdier som ligger mellom de ratene som er testet i Japan. Tilsvarende kan observeres for den store pelen som, til tross for størst pumpehastighet, får lavere effektverdier enn testen med 8 l/min i Japan, noe som gjenspeiles av at den store pelen testes ved et lavere Reynolds tall. Bemerk imidlertid at alle testene i Tabell 6-1 testes for laminære strømningsforhold ($Re < 2300$).

En konsekvens av effekt-skaleringen på formen $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}$ er tilsynelatende at denne skaleringen virker å muliggjøre en direkte overføring av test dataene til peler med andre dimensjoner og lengder enn de konkrete pelene som er testet. Hvis f.eks. den lille BEAR pelen hadde hatt samme lengde og testbetingelser på inngående vanntemperatur, som den store BEAR pelen, viser $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1}$ -dataene i Tabell 6-1 at 2,4 slike peler (tilsvarende diameterforholdet $\frac{\text{Ø}_{\text{ID}314}}{\text{Ø}_{\text{ID}130}}$) vil kunne gi samme energidekning ($17,5 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}\text{t}^{-1} \cdot 26 \text{ m} \cdot 7,1 \cdot 10 \text{ timer} = 32 \text{ kWh}$) som den store pelen fikk i BEAR testen ($31,9 \text{ kWh}$, se Figur 6-10). Dette stemmer utmerket med energidataene til den lille pelen i Figur 6-10 som omregnet til samme forhold ($3,1 \text{ kWh} \cdot 26 \text{ m} / 14 \text{ m} \cdot 7,1^\circ\text{C} / 3,0^\circ\text{C} \cdot 2,4 \text{ stk.} = 32 \text{ kWh}$) viser det samme.

6.3 Sammenligning mot energipeler med U-kollektorer

Jalaluddin et al. (2011) har presentert TRT-forsøk med ulike kollektor-rør i samme BSR-pel. I og med at BEAR-pelene oppnår tilnærmet like resultater som Jalaluddin et al. (2011) for de vannfylte testene er det rimelig å tro at de samme forskjellene vil oppstå hvis BEAR-pelene også testes med kollektor-rør. I Japan viser testene at enkel U-kollektor-rør i BSR-peler fylt med silica-sand og vann gir ca. 33 %-poeng dårligere varmeoverføringsrate enn tilsvarende peler med BEAR-designet. Videre testing vil kunne bekrefte dette også for BEAR-pelene i Malvik.

6.4 Konklusjoner om BSR-pelens varmeoverføringspotensial

Pilottestene av BSR-peler som er installert i BEAR prosjektet viser at:

- Peler designet som en vannfylt tank vil ha vesentlig bedre energioverføringsrater enn konvensjonelle energipeler som benytter integrerte kollektor-rør som varmevekslere.
- Energioverføringsraten ved like innstrømnings-betingelser er ca. 4,5 ganger større for den store BEAR-pelen (Ø_{ID} 310 mm * 26 m lengde) enn overføringsraten til den lille pelen (Ø_{ID} 130 mm * 14 m lengde), noe som i all hovedsak sammenfaller med pelens ulikheter i diameter- og lengde-forhold.
- Den skalerte effektkurven fra TRT-testene (se Figur 6-13 og Tabell 6-1) viser at pelens funksjon som varmeveksler med løsmasser i all hovedsak er styrt av pelens totale overflateareal som står i kontakt med løsmassene. Indre diameter (Ø_{ID}) på pelen og pelens lengde (L) er følgelig avgjørende designparametere for effektdekningen og energidekningen til pelen.

Dette er svært nyttige betraktninger sett i lys av hvilke forenklinger dette kan innebære i dimensjoneringsøyemed. For energipeler utformet som vannfylte BSR-energipeler vil uttesting av mindre peler i tidligfase av prosjekter kunne ha overføringsverdi til detaljprosjektering senere hvor det er aktuelt å justere fundamenteringspelens størrelse, antall og lengder. Imidlertid, i og med at det er løsmassenes termiske egenskaper som i all hovedsak styrer pelens energipotensial forutsetter denne tilnærmingen at grunnforholdene er like som for testpelen. Tidligfase kartlegging av jordegenskaper i energipel-prosjekter er derfor viktig. I det vesentligste vil konvensjonelle grunnundersøkelser, som CPTU (med temperatur-plott) og analyse for jordparametere (vanninnhold, tyngdetetthet osv.) være tilstrekkelig i tidligfasen.

7 Forslag til videre arbeid

Som følge av installasjonsutfordringer ble ikke den store pelen vanntett og kunne ikke trykkesettes. Ved videre testing bør pelene tettes med en tynn gummimembran for å sikre at pelene er vanntette. Dette vil også kunne bidra til å forhindre innvendig korrosjon på stålrørene. Når pelene er tett vil TRT-forsøkene kunne gjennomføres ved høyere temperaturer og pelens termiske ekspansjons-reaksjoner vil kunne måles og dokumenteres.

8 Referanser

Adinolfi, M.; Maiorano, R. M. S.; Mauro, A.; Massarotti, N.; Aversa, S. (2018) *On the influence of thermal cycles on the yearly performance of an energy pile*. Geomechanics for Energy and the Environment, Elsevier, Vol. 16, pp. 32-44.

Brandl, H. (2006) *Energy foundations and other thermo-active ground structures*. Geotechnique. Vol. 56. Issue 2. pp. 81-122.

Pelekomit  (2019) *Peleveiledningen*. Norsk Geoteknisk Forening. pp. 314

Fardoun, F., Meftah, F. & Mohamad, Z. (2021) *A review on energy piles design, evaluation, and optimization*. I Prof. Jiri Jaromir Klemes (Red.), Journal of Cleaner Production. Vol. 292. pp. 25

Gehlin, S. (1998) *Thermal response Test – In Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock*. Licentiate Thesis. Insitution f r Samh llsbyggnadsteknik. Lule  Tekniska Univeristet.

Gustafsson, A.-M. & Westerlund, L. (2010) *Mult-injection rate thermal response test in groundwater wfilled borehole heat exchanger*, Renewable Energy, Elsevier, Vol 35, pp. 1061-1070.

Jalaluddin, Miyara, A.; Tsubaki, K.; Inoue, S.; Yoshida, K. (2011) *Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation*, Renewable Energy, Elsevier, Vol. 36-2. pp. 764-771.

Laloui, L. & Loria, A. F. R. (2020). *Analysis and Design of Energy Geostructures*. London: Academic Press.

Maragna, C.; Loveridge, F. (2022) *A New Approach for Characterizing Pile Heat Exchangers using Thermal Response Tests*. Energies. MDPI. Vol. 14 (2). pp. 3375.

Priscilla, P. (NGI - 2020a) *Saksvik Renseanlegg – Datarapport*. Norges Geotekniske Instiutt. Dokumentnummer 20190898-01-R.

Priscilla, P. (NGI - 2020b) *Saksvik Renseanlegg – Datarapport*. Norges Geotekniske Instiutt. Dokument nummer 20190898-02-R.

Zarrella, A.; De Carli, M.; Galgaro, A. (2013) *Thermal performance of two types of energy foundation pile: helical pipe and triple U-tube*. Appl Therm Eng. Vol. 61 Issue 2. pp. 301-310.

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Bærekraftig Energi fra løsmAsser- Pilotprosjektet på Saksvik		Dokumentnr./Document no. 20210083-01-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client Regionalt forskningsfond Trøndelag	Dato/Date 2023-07-31
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract Oppdragsgiver / Client		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 0
Distribusjon/Distribution ÅPEN: Skal tilgjengeliggjøres i åpent arkiv (BRAGE) / OPEN: To be published in open archives (BRAGE)		
Emneord/Keywords Energipel, TRT-test, poretrykk, pilot, geoenergi, grunnvarme		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country Norge, Trøndelag	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality Malvik	Felt navn/Field name
Sted/Location Saksvik	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: Øst: Nord:	Koordinater/Coordinates Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/Document control Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument	2023-07-31 Sondre Gjengedal	2023-03-06 Priscilla Paniagua López		

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 31. juli 2023	Prosjektleder/Project Manager Sondre Gjengedal
--	-----------------------------------	--

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: GeoMiljø – Offshore energi – Naturfare – GeoData og teknologi

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Geotechnics and Environment – Offshore energy – Natural Hazards – GeoData and Technology.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

