

Celina Julia Engen

# Høytemperatur termisk energilagring i borhull ved Nyhavna, Trondheim

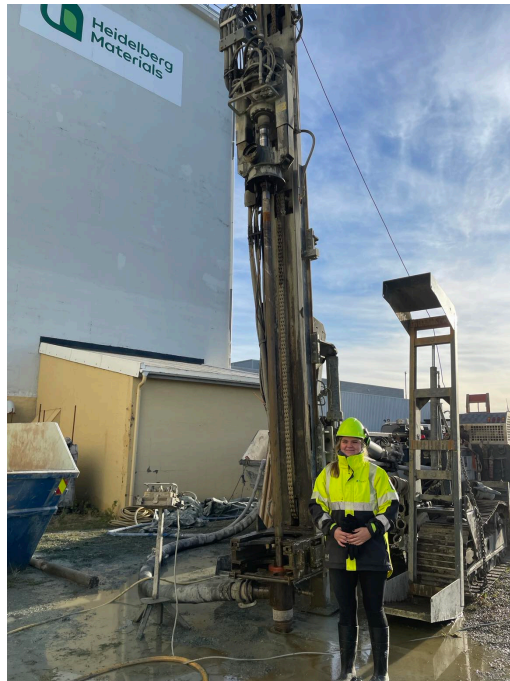
Berggrunnens mekaniske egenskaper ved syklisk oppvarming, termisk ledningsevne og visuell 3D-modell

Masteroppgave i Geologi

Veileder: Bjørn Frenstad

Medveileder: Randi Kalskin Ramstad

Mai 2024





Celina Julia Engen

# Høytemperatur termisk energilagring i borhull ved Nyhavna, Trondheim

Berggrunnens mekaniske egenskaper ved syklisk oppvarming, termisk ledningsevne og visuell 3D-modell

Masteroppgave i Geologi  
Veileder: Bjørn Frengstad  
Medveileder: Randi Kalskin Ramstad  
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden



# Sammendrag

Denne masteroppgaven har vurdert etableringen av et høytemperatur sesongvarmelager på Nyhavna i Trondheim fra flere perspektiver. Ved vurderingen av områdets egnethet har syv testbrønner blitt boret. I disse testbrønnene har grunnens effektive varmeledningsevne og termiske borehullsmotstand blitt funnet ved å gjennomføre termiske responstester (TRT). Disse parameterne vil avgjøre hvor egnet berggrunnen er til å overføre og holde på tilført varme, essensielle faktorer ved et sesongvarmelager. TRT-testene viste en gjennomsnittlig effektiv varmeledningsevne,  $\lambda_{\text{effektiv}}$ , på 3.86 W/m<sup>2</sup>\*K, da sett vekk ifra et misvisende resultat fra testbrønn 3 på 6.20 W/m<sup>2</sup>\*K grunnet et vannførende lag. Verdien tyder på at berggrunnen er egnet til sesongvarmelagring.

Høy varmeledningsevne fører til at avstanden mellom energibrønnene kan være større, men varmetapet i kantene av lageret vil dessverre øke. Alle brønnene hadde en lav termisk borehullsmotstand, noe som indikerer god varmeoverføring mellom kollektorrøskene og borehullet. Mulige vannførende lag i grunnen har også blitt detektert ved de termiske responstestene, ved å se på temperaturutviklingen nedover i borehullet over tid. Kun testbrønn 3 hadde et vannførende lag ved 190 - 203 meters boredyp.

Mulige endringer i de mekaniske egenskapene til bergmassen i et sesongvarmelager som utsettes for temperatursvingninger ble også vurdert ved denne masteren. Kjerneprøver fra en grønnstein ble boret ut for å gjennomføre laboratorietesting der halvparten av kjernene ble utsatt for temperatursvingninger. 43 temperatursykluser ble gjennomført, fra romtemperatur opp til 105 °C. Oppvarmingsperioden var på 7-8 timer og nedkjølingsperioden var på 16-17 timer. For å teste hvilken mulig effekt oppvarmingene hadde hatt på kjernene ble totalt 244 punktlasttester gjennomført. Resultatene viste at den korrigerte punktlaststyrkeindeksen  $I_s$  for de oppvarmede kjernene var signifikant høyere for både de diametrals- og de aksielle punktlasttestene. Denne signifikante forskjellen tyder på at bergmassen vil oppleve en økning i mekanisk styrke som følge av temperatursvingningene i sesongvarmelageret.

Under boringen av testbrønn 3 ble kaksprøver for hver niende bormeter samlet inn. Fem av de 25 innsamlede kaksprøvene ble det gjennomført XRD-analyse av.

XRD-analysen ga en kvalitativ og kvantitativ analyse av mineralene i prøven. Alle prøvene besto av en betydelig andel kvarts (fra 10.7 % opp til 39.9 %). Basert på vektprosent av de ulike mineralene ble teoretisk varmeledningsevne beregnet til å variere fra 4.20 W/m<sup>2</sup>\*K opp til 8.53 W/m<sup>2</sup>\*K. Verdien indikerte egnede forhold for sesongvarmelagring. Her vil TRT-resultatene være viktigst, siden de indikerer de faktiske forholdene ute i felt over et større område.

En 3D-modell i programmet Leapfrog Geo ble produsert som en del av denne masteroppgaven. Modellen representerer grunnforholdene på Nyhavna ved å inkludere de syv testbrønnene og 18 totalsonderboringer. Berg- og løsmassegrensen ble modellert inn basert på dybden til fjell ved testbrønnene og totalsonderboringer. Det vannførende laget i testbrønn 3 ved 200 meters boredyp og XRD-resultatene fra de fem kaksprøvene i testbrønn 3 ble også modellert inn. To tverrsnitt for å vise berg- og løsmassekontakten ble også modellert inn, i tillegg til høydekurver. I tillegg ble en digital terrengmodell, en dybdemodell og et ortofoto lastet opp i modellen. Denne modellen er et forsøk på å gjengi virkeligheten i en forenklet versjon. Modellen vil kunne bidra til å øke forståelsen og samarbeidet mellom ulike fagområder.

# Abstract

This master's thesis has assessed the establishment of a high-temperature seasonal thermal storage site at Nyhavna, Trondheim from several perspectives. When assessing the suitability of the area, seven test wells have been drilled. In these test wells the effective thermal conductivity of the ground and the thermal borehole resistance have been found by carrying out thermal response tests (TRT). These parameters will determine how suitable the bedrock is to transfer and retain added heat, essential factors of a seasonal heat storage. The TRT tests showed an average effective thermal conductivity,  $\lambda_{\text{effective}}$ , of 3.86 W/m\*K, not including a misleading result from test well 3 on 6.20 W/m\*K due to a water-bearing layer. The values suggest that the bedrock is suitable for seasonal heat storage.

High thermal conductivity means that the distance between the energy wells can be larger, but the heat loss at the edges of the storage will unfortunately increase. All the wells had a low thermal borehole resistance, indicating good heat transfer between the collector fluid and the borehole. Possible water-bearing layers in the ground have also been detected by the thermal response tests, by looking at the temperature development downwards in the borehole over time. Only test well 3 had a water-bearing layer at drilling depth of 190 - 203 meters.

Possible changes in the mechanical properties of the rock mass in a seasonal thermal storage which are exposed to temperature fluctuations were also assessed in this master's thesis. Core samples from a greenstone were drilled out to carry out laboratory testing where half of the cores were exposed to temperature fluctuations. 43 temperature cycles were carried out, from room temperature up to 105 °C. The warm-up period lasted 7-8 hours and the cooling period lasted 16-17 hours. To test the possible effect the heating had on the cores, a total of 244 point load tests were carried out. The results showed that the corrected point load strength index  $I_s$  for the heated cores were significantly higher for both the diametral and the axial point load tests. This significant difference suggests that the rock mass will experience an increase in mechanical strength as a result of the temperature fluctuations in the seasonal heat storage.

During the drilling of test well 3, drill cuttings were collected for every ninth borehole meter. Five of the 25 drill cutting samples were subjected to XRD analysis.

The XRD analysis provided a qualitative and quantitative analysis of the minerals in the sample. Every sample consisted of a significant proportion of quartz (from 10.7% up to 39.9%). Based on weight percent of the various minerals, theoretical thermal conductivity was calculated to vary from 4.20 W/m\*K up to 8.53 W/m\*K. The values indicated suitable conditions for seasonal heat storage. Here, the TRT results will be most important, since they indicate the actual conditions out in the field over a larger area.

A 3D-model in the program Leapfrog Geo was produced as part of the master's thesis. The model represents the ground conditions at Nyhavna by including the seven test wells in bedrock and the 18 cone penetration test boreholes. The boundary between rock and soil was modelled based on the depth to rock in the test wells and the cone penetration test boreholes. The water-bearing layer in test well 3 at a drilling depth of 200 meters and the XRD results from the five drill cuttings in test well 3 were also modelled. Two long sections to show the rock- and soil boundary were modelled, as well as elevations. In addition, a digital terrain model, a depth model and an orthophoto were uploaded into the model. This model is an attempt to recreate reality in a simplified version. The model may contribute to increasing understanding and cooperation between different specialist areas.

# Forord

Denne 60-poengs masteroppgaven er den avsluttende innleveringen ved gjennomføring av master i "Miljø- og anleggsgeologi" ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet ved Instituttet for geovitenskap og petroleum. Masteroppgaven ble påbegynt høsten 2023 og fullført våren 2024.

Laboratoriarbeidet som ble gjennomført ved XRD-analyse, boring av kjerneprøver, punktlasttesting og oppvarming av kjerner ble gjennomført på bergmekanisk laboratorium ved NTNU.

Igjennom dette året har jeg en rekke folk å takke for hjelp, veiledning og motivasjon. Min hovedveileder Bjørn Frengstad har stilt opp både for faglig veiledning, så vel som en god støttespiller igjennom året. Uten viktige innspill og gode tilbakemeldinger ville ikke denne masteren vært det den er. Jeg vil også takke medveileder Randi Kalskin Ramstad for faglig hjelp og veiledning av oppgaven.

Ved gjennomføring av 3D-modellen i Leapfrog vil jeg rette en stor takk til Steinar Løve Ellefmo. Han har vært eksepsjonell ved hjelp i innføring i programmet, veiledning underveis og hjelp i prosjektet. Uten han hadde det vært langt verre å skulle sette seg inn i programmet på så kort tid. Når det kommer til input-parameterne i Leapfrog vil jeg takke Anders Samstad Gylland for kvalitetssikring av tolkninger av totalsonderboringer.

Når det kommer til gjennomføring av punktlasttestene har Jon Runar Drotninghaug vært til stor hjelp med veiledning under testingen, for alle mulige spørsmål og ved boring av kjerneprøver. Ved XRD-analysen vil jeg takke Laurentius Tjihuis for veldig god innføring og veiledning under både preparering, gjennomføring og analysering av resultatene fra analysen. Takk til Torill Sørlokk for hjelp på laboratoriet. Under innsamling av kaksprøver ved boringen var guttene fra Båsum Boring til stor hjelp, noe som ble satt veldig pris på.

Jeg vil også takke tidligere masterstudentene Sofie Hartvigsen og Johanne Strålberg for hjelp med å få viktig data til denne masteren. De har også gått frem som et godt eksempel på hvordan det skal gjøres, og har inspirert til flere av løsningene i denne masteren.

Takk for sponsing fra Enova, Statkraft varme og Asplan Viak som gjør gjennomføringen av denne masteren mulig. Veldig takknemlig for at jeg har fått vært med på et så spennende og lærerikt prosjekt.

Jeg vil også takke medstudenter for at vi sammen har motivert hverandre til å være på lesesal og støttet hverandre. Til slutt vil jeg takke venner, kjæreste og familie for støtte og gode avbrekk.

Celina Julia Engen, mai 2024

# Innhold

<b>Figurer</b>	<b>viii</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xi</b>
<b>Forkortelser og symboler</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>2 Tidligere arbeid</b>	<b>4</b>
2.1 Bergets respons på oppvarming . . . . .	4
2.1.1 Litteraturstudie om tidligere laboratorieundersøkelser med oppvarming av prøver i det milde temperaturområdet . . . . .	4
2.1.2 Oppvarming og pålastning av Beishan granitt i det milde temperaturområdet . . . . .	8
2.1.3 Bergartsprøver utsatt for sykliske temperaturendringer . . . . .	8
2.1.4 Varmeledningsevnen til ulike bergartsprøver ved oppvarming .	9
2.1.5 Varmekapasiteten til ulike bergartsprøver ved gjentatt oppvarming . . . . .	11
2.2 Varmeledningsevne og termiske responstester i Trondheimsområdet .	12
<b>3 Teori</b>	<b>14</b>
3.1 Grunnvarme . . . . .	14
3.1.1 Temperaturen i grunnen . . . . .	14
3.1.2 Energibrønner . . . . .	15
3.1.3 Type kollektorslange i borehullet . . . . .	18
3.1.4 Varmepumper - for å heve temperaturen . . . . .	19
3.1.5 Grunnvannets betydning . . . . .	21
3.1.6 Dimensjonering av større anlegg . . . . .	22
3.1.7 Høytemperatur sesongvarmelager . . . . .	22
3.2 De tre varmeoverføringsmekanismene . . . . .	25
3.3 Varmeledningsevne . . . . .	26



3.3.1	Innvirkende faktorer på varmeledningsevnen . . . . .	27
3.3.2	Bergarter sin varmeledningsevne . . . . .	28
3.3.3	Kvarts sin betydning for varmeledningsevnen . . . . .	31
3.4	Varmekapasitet . . . . .	32
3.5	Termisk responstest . . . . .	32
3.5.1	Feilkilder som kan gi misvisende resultater . . . . .	35
3.5.2	Matematiske modeller for analyse av resultatene . . . . .	35
3.5.3	Distribuerte temperaturmålinger med fiberoptiske kabler . . . . .	35
3.6	XRD . . . . .	36
3.7	Punktlasttest . . . . .	38
3.8	Leapfrog . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Områdebeskrivelse</b>	<b>40</b>
4.1	Historien til Nyhavna . . . . .	40
4.2	Løsmassene på Nyhavna . . . . .	42
4.3	Berggrunnen på Nyhavna . . . . .	43
4.4	Tidligere grunnundersøkelser på Nyhavna . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Metode</b>	<b>46</b>
5.1	Boring av testbrønn på Nyhavna . . . . .	46
5.2	Kaksprøver samlet inn under boringen av testbrønnen . . . . .	48
5.3	Innhenting av grønnstein for kjerneboring . . . . .	50
5.3.1	Kjerneboring av grønnsteinen . . . . .	51
5.4	Kjerneprøver utsatt for sykliske temperaturendringer . . . . .	53
5.5	Kontrollgruppe uten sykliske temperaturendringer . . . . .	54
5.6	Punktlasttest av kjerneprøver . . . . .	55
5.7	XRD av kaksprøver . . . . .	59
5.7.1	Preparering av prøver til XRD-analyse . . . . .	59
5.7.2	XRD-analyse . . . . .	61
5.8	Teoretisk utledet varmeledningsevne fra XRD-resultatene . . . . .	62

5.9	3D-modell i Leapfrog Geo . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Resultater</b>	<b>66</b>
6.1	Kaksprøver . . . . .	66
6.2	XRD-analyse . . . . .	69
6.3	Teoretisk utledet varmeledningsevne basert på XRD-resultatene . . .	73
6.4	Tetthet av kjerneprovne . . . . .	73
6.5	Punktlasttest av kjerneprovner . . . . .	73
6.6	Kategorisering av kjerneprovner . . . . .	75
6.7	Termisk responstest av borehullene . . . . .	76
6.8	3D-modell i Leapfrog Geo . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>86</b>
7.1	Feilkilder . . . . .	86
7.2	Er Nyhavna egnet for etablering av et sesongvarmelager? . . . . .	88
7.2.1	Termiske responstester i testbrønnene . . . . .	88
7.2.2	Grunnvannsbevegelser . . . . .	89
7.2.3	Vannførende lag sett i sammenheng med borehullsaaavik . . . . .	89
7.2.4	Teoretisk varmeledningsevne og egnethet . . . . .	91
7.2.5	Høy teoretisk varmeledningsevne sett i sammenheng med en stor andel pyritt . . . . .	93
7.2.6	Faktoren av størst betydning - de termiske responstestene . . .	94
7.2.7	Berggrunnens mekaniske påvirkning etter flere sesonger med temperatursykluser . . . . .	94
7.2.8	Forholdene ute i felt sammenlignet med analysen gjennomført på laboratoriet . . . . .	96
7.2.9	Økning i mekanisk styrke grunnet valgt testmetode . . . . .	96
7.2.10	Kategorisering av kjernene basert på kvalitet - gjennomsnitt og antall ikke-godkjente . . . . .	97
7.2.11	Høyere effektiv varmeledningsevne i testbrønn 3 sammenlignet med de andre seks testbrønnene . . . . .	98
7.2.12	Oppvarmingens effekt på varmeledningsevnen . . . . .	99

7.3	3D-modell over grunnforholdene på Nyhavna i Leapfrog Geo . . . . .	100
7.3.1	Representativitet og mulige bruksområder . . . . .	100
7.3.2	Bindeledd mellom ulike fagområder og enkel visuallisering . .	100
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>102</b>
	<b>Referanser</b>	<b>104</b>
	<b>Appendix</b>	<b>111</b>
<b>1</b>	<b>Vedlegg</b>	<b>111</b>
A	Punktlasttestene . . . . .	111
B	Kaksbeskrivelser . . . . .	118
C	XRD-Resultater i Diffrac.TOPAS . . . . .	119
D	Skjerm bilde av inputfilene i Leapfrog . . . . .	124
E	Eksempelutregning av teoretisk varmeledningsevne . . . . .	130

## Figurer

1.1	Bilde av oppgaveteksten til denne masteroppgaven . . . . .	3
2.1	Fysiske prosesser i bergarter ved oppvarming . . . . .	6
2.2	Figur av bergstyrkens utvikling ved oppvarming . . . . .	8
2.3	Varmeledningsevnen sin utvikling til bergarter ved oppvarming . . . .	10
3.1	Geotermisk gradient . . . . .	15
3.2	Illustrasjon av et lukket system . . . . .	16
3.3	Illustrasjon av et åpent system . . . . .	18
3.4	De to ulike kollektorslangene . . . . .	19
3.5	Prinsipptegning av en varmepumpe . . . . .	20
3.6	Illustrasjon av energikilder og bruksområder for en væske-vann varmepumpe . . . . .	21
3.7	Illustrasjon tilføring og uthentning av energi fra borehullet . . . . .	23
3.8	Mulige design av et sesongvarmelager . . . . .	23
3.9	Temperaturutvikling i lageret over flere sesonger . . . . .	24
3.10	Kvartsinnhold sin innvirkning på varmeledningsevnen . . . . .	31
3.11	Bilde av oppsettet ved gjennomføring av en termisk responstest . . .	33
3.12	Illustrasjon av oppsettet ved gjennomføring av en termisk responstest	34
3.13	Illustrasjon av Braggs lov . . . . .	37
3.14	Illustrasjon av diametral og aksial punktlasttest på kjerner . . . . .	38
4.1	Floridakysten på Nyhavna . . . . .	40
4.2	Tilfluktstårn på Nyhavna . . . . .	41
4.3	Løsmassekart over Nyhavna . . . . .	42
4.4	Berggrunnkart over Nyhavna . . . . .	44
4.5	Kart over grunnundersøkelsene gjennomført på Nyhavna . . . . .	45
5.1	Kart over Nyhavna med testbrønnene . . . . .	46
5.2	Kart over Nyhavna med testbrønnene . . . . .	47
5.3	Kaksprøvene hentet inn under boringen av testbrønn 3 . . . . .	48
5.4	Bilder under boring: Kontaineren og påkobling av rør for kaks og vann	49

5.5	Bilder under boring: Kaks og vann ut i kontainer, masseoppsamling i kontaineren, løsmasser på bakken under løsmasseboringen . . . . .	50
5.6	Kart over Steinan der grønnsteinen ble hentet . . . . .	51
5.7	Grønnstein fra Steinan og radialbormaskin benyttet for kjerneboring .	52
5.8	Bilde av kjernesylindrerne som ble oppvarmet . . . . .	53
5.9	Bilde av kjernesylindrerne som ikke ble oppvarmet . . . . .	54
5.10	Bilde av testutstyret benyttet ved punktlasttesten . . . . .	55
5.11	Eksempel på en ikke-godkjent prøve ved diametral punktlasttest . . .	56
5.12	Bilde av kjernesylindrerne som ikke ble oppvarmet . . . . .	57
5.13	Prøver som skulle kuttes for aksial punktlasttest . . . . .	57
5.14	Kaksprøvene valgt ut for XRD-analyse . . . . .	59
5.15	Testutstyr for preparering av kaksprøver til XRD-analyse . . . . .	60
5.16	Testutstyr og prøver ved preparering for XRD-analyse . . . . .	61
5.17	Maskinen for XRD-analyse . . . . .	62
5.18	Eksempel på tolkning av totalsonderboring på Nyhavna . . . . .	65
6.1	Kaksprøvene i gruppe 1 . . . . .	66
6.2	Kaksprøvene i gruppe 2 . . . . .	67
6.3	Kaksprøvene i gruppe 3 . . . . .	68
6.4	Kaksprøver som skilte seg ut . . . . .	68
6.5	Søylediagram av resultatene fra XRD-analysen . . . . .	70
6.6	Illustrasjon av XRD-resultatene nedover i testbrønn 3 . . . . .	72
6.7	Boksplott av resultatene etter punktlasttestene . . . . .	74
6.8	Bruddflate etter diametral punktlasttest . . . . .	75
6.9	Fiberoptiske temperaturprofilmålinger i testbrønn 3, 4, 5 og 6 . . . .	78
6.10	Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog ovenifra med borehullsID, tverrsnittene, avgrensningen og høydekurver . . . . .	80
6.11	Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog med tverrsnittene, testbrønnene og totalsonderboringene . . . . .	81
6.12	Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog med markeringer . . . . .	82
6.13	Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog av totalsonderboringene . . .	83

6.14	Tverrsnitt SV-NØ i 3D-modellen . . . . .	84
6.15	Tverrsnitt NV-SØ i 3D-modellen . . . . .	85
7.1	Kart og figur som viser borehullsavviket . . . . .	90
7.2	Illustrasjon av pyritt i lag og jevnt fordelt . . . . .	93
C.1	XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 9 . . . . .	119
C.2	XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 21 . . . . .	120
C.3	XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 27 . . . . .	121
C.4	XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 39 . . . . .	122
C.5	XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 54 . . . . .	123
D.1	Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog: collar . . . . .	124
D.2	Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog: survey . . . . .	125
D.3	Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog: Lithology figur 1 . . . . .	126
D.4	Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog: Lithology figur 2 . . . . .	127
D.5	Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog: Lithology figur 3 . . . . .	128
D.6	Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog: Assay . . . . .	129
D.7	Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog: vannforende 3 . . . . .	129
E.1	Eksempelutregning av teoretisk varmeledningsevne . . . . .	130

## Tabeller

1	Tabell over ulike termiske responstester gjennomført av Asplan Viak i Trondheimsområdet . . . . .	13
2	Varmeledningsevnen til ulike materialer . . . . .	27
3	Ulike mineralers varmeledningsevne . . . . .	29
4	Ulike faktorer sin innvirkning på varmeledningsevnen . . . . .	30
5	Tabell over bergarter sin varmeledningsevne . . . . .	31
6	Tabell over testbrønnene og tilhørende borehullsID benyttet i Leapfrog	63
7	Tabell over teoretisk utledet varmeledningsevne . . . . .	73
8	Gjennomsnittsverdiene av korrigert punktlaststyrkeindeks til de ulike kategoriene (god, ok, dårlig) og antall ikke-godkjente . . . . .	76
9	Resultater fra termisk responstester i testbrønnene på Nyhavna . . . . .	77
10	Kaksprøvenes kvartsinnhold . . . . .	91
11	Sammenligning av teoretisk utregnet varmeledningsevne med effektiv varmeledningsevne . . . . .	92
A.1	Tabell over punktlasttest resultatene: diametral test på oppvarmede kjerner . . . . .	112
A.2	Tabell over punktlasttest resultatene: Aksial test på oppvarmede kjerner tabell 1 . . . . .	113
A.3	Tabell over punktlasttest resultatene: Aksial test på oppvarmede kjerner tabell 2 . . . . .	114
A.4	Tabell over punktlasttest resultatene: diametral test på ikke-oppvarmede kjerner . . . . .	115
A.5	Tabell over punktlasttest resultatene: Aksial test på ikke-oppvarmede kjerner tabell 1 . . . . .	116
A.6	Tabell over punktlasttest resultatene: Aksial test på ikke-oppvarmede kjerner tabell 2 . . . . .	117
B.1	Tabell over beskrivelse av alle kaksprøvene hentet fra testbrønn 3 . . . . .	118

## Forkortelser og symboler

$\lambda$  Varmedningsevne ( $W/m * K$ )

$\lambda_{\text{effektiv}}$  Effektiv varmedningsevne ( $W/m * K$ )

$\lambda_{\text{teoretisk}}$  Teoretisk varmedningsevne ( $W/m * K$ )

$\rho$  Tetthet ( $Kg/m^3$ )

$\sigma$  Spenning (MPa)

$C_m$  Den spesifikke varmekapasiteten ( $J/K*kg$ )

$I_s$  Punktlaststyrkeindeksen (MPa)

$I_s(50)$  Den korrigerede punktlaststyrkeindeksen (MPa)

$^{\circ}C$  Grader Celsius

AE Acoustic Emissions

BTES Borehole Thermal Energy Storage

C Varmekapasitet (J/K)

CSV Comma-separated values

EED Earth Energy Designer

FGDB Filgedatabase

GIS Geografiske Informasjonssystemer

HT-BTES High Temperature Borehole Thermal Energy Storage

ID Identifikasjon

LRH Leeb Rebound Hardness

NTNU Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

PTS Petroleum Teknisk Senter



Q Varmebølge raten til den termiske konduksjonen (W)

T Temperatur

TPS Transient Plane Source

TRT Termisk Respons Test

UCS Uniaxial Compressive Strength

UPV Ultrasonic Pulse Velocity

XRD X-ray Diffraction Analysis

# 1 Introduksjon

En ny bydel skal utbygges på det nåværende industriområdet på Nyhavna i Trondheim. Planen er å utbygge nye boliger og kontorlokaler der det idag er industri som dominerer. Denne nye bydelen skal være et nullutslippsområde, og en av de flere måtene å realisere dette på er å etablere et høytemperatur borehullsbasert sesongvarmelager. Et slikt energilager baserer seg på å bore en rekke energibrønner ned i berggrunnen som vil tilføre og hente opp energi. Berggrunnen vil fungere som et stort batteri, der energi kan tilføres på sommerstid og hentes opp igjen på vinteren. Dette sesongvarmelageret skal ligge på Ladehammerkaia og dekke hele bydelens oppvarmingsbehov på vinteren. Lageret skal kobles på og tilføres energi fra fjernvarmenettet. Blant annet skal restvarme fra avfallsbrenneriet på Tiller tilføres sesonglageret på sommerhalvåret. Et essensielt spørsmål er om berggrunnen er egnet for etablering av et slikt anlegg. I denne utredningen av berggrunnen har det blitt boret syv testbrønner og gjennomført tilhørende termiske responstester. Disse responstestene skal avdekke berggrunnens egnethet i form av effektiv varmeledningsevne, termisk borehullsmotstand og deteksjon av mulige vannførende lag.

Ved boring av testbrønn 3 ble kaksprøver samlet inn for hver 9-ende meter. Dette ble gjort for å visuelt observere kakset nedover i borehullet og teste noen utvalgte prøver med røntgendiffraksjon (XRD). XRD-analysen vil gi informasjon om hvilke mineraler og kvantiteten av de ulike i hver enkelt kaksprøve. Basert på denne informasjonen ble den teoretiske varmeledningsevnen for hver kaksprøve regnet ut, og denne verdien var med på å avgjøre berggrunnens egnethet.

I et høytemperatur sesongvarmelager vil det, som navnet indikerer, involvere høye temperaturer. I tillegg vil denne temperaturen variere ut ifra sesongen, og dermed utsette berggrunnen for sykliske temperaturendringer. Det er ønskelig å undersøke om sykliske temperaturendringer medfører svekkelse av berggrunnens mekaniske styrke over tid. Denne masteroppgaven undersøkte dette ved å utsette kjerneprøver av grønnstein for sykliske temperaturendringer. Det er valgt å teste på grønnstein siden det er denne bergarten som dominerer på Nyhavna der lageret vil etableres.

Hovedfokuset er hvilken effekt temperatursyklusene vil ha på kjernenes mekaniske styrke. For å måle denne utviklingen ble punktlasttester gjennomført på både kjerner utsatt for temperaturendringer og en kontrollgruppe. Resultatene ble presentert i fire boksplokk der den korrigerede punktlaststyrkeindeksen ble sammenlignet.

En annen del av masteroppgaven har vært å lage en 3D-modell av grunnforholdene på Nyhavna i programmet Leapfrog Geo. Det har blitt gjort en rekke grunnundersøkelser på Nyhavna relatert til etableringen av sesongvarmelageret, boring av syv testbrønner og 18 totalsonderboringer. Disse testbrønnene og sonderboringene har blitt modellert inn i Leapfrog, sammen med en digital terrengmodell, en dybdemodell og et ortofoto. Basert på fiberoptiske temperaturmålinger tatt i testbrønnene har et vannførende lag blitt detektert i testbrønn 3. Dette vannførende laget har også blitt modelert inn i 3D-modellen.

Bilde av oppgaveteksten til denne masteroppgaven kan ses ved figur 1.1 på neste side.

**GEOL3090 Masteroppgave i geologi 2023-2024****Student:** Celina Julia Engen**Hovedveileder:** Bjørn Frengstad, IGP**Medveileder:** Randi Kalskin Ramstad, Asplan Viak/IGP**Oppgavetekst**

Nyhavna i Trondheim skal bygges ut med boliger for 5200 og kontorplass for 4000 mennesker. Samtidig er det et mål at området skal produsere all energi og effekt lokalt. NTNU er invitert inn til å undersøke flere nyskapende muligheter og eventuelle konsekvenser av disse. En av mulighetene som skal undersøkes, er å etablere et sesongvarmelager i berget som kan ta overskuddsvarme i sommerhalvåret og lagre det inntil det er behov for varmen i vinterhalvåret.

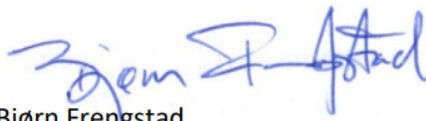
Varmelageret skal være knyttet til fjernvarmenettet og vil derfor lagre varme ved svært høye temperaturer (90°C). I tidligere tiders gruvedrift ble fyrsetting brukt for å gjøre berget sprøtt og enklere å bryte. Da ble berget varmet opp til flere hundre grader. I sesongvarmelageret på Nyhavna vil berget varmes opp til mer moderate temperaturer, men det vil være en gjentatt oppvarming og avkjøling gjennom året. Det er lite kjent hva en slik syklisk termisk belastning vil gjøre med bergets mekaniske egenskaper over tid. Masteroppgaven inkluderer et litteraturstudium for å finne tidligere forskning på berggrunnens oppførsel under termiske påkjenninger.

I masteroppgaven vil det bli samlet inn borkaks fra de lokale bergmassene under etableringen av pilotbrønner i varmelageret. Bergartsprøvene skal undersøkes og beskrives petrografisk og mineralogisk og med hensyn på termiske egenskaper som varmeledningsevne og varmekapasitet. Videre skal det utvikles en prosedyre for testing av bergets mekaniske egenskaper under gjentatt oppvarming og avkjøling mellom 20 og 100 grader som skal brukes til å undersøke om moderat syklisk oppvarming har effekt på bergmassens kvalitet.

Pilotbrønnene vil utstyres med fiberoptisk kabel som kan måle temperaturen tilnærmet kontinuerlig langs borhullsveggen. Det vil utføres termisk responstest i pilotbrønnene og en del av masteroppgaven vil bestå i tolkning av disse resultatene. Det kan også bli aktuelt å fremstille en visuell geologisk modell av undergrunnen under Nyhavna der varmelageret er tenkt etablert

Oppgaven leveres gjennom Inspera. Det forventes figurer og tabeller med god lesbarhet og fotodokumentasjon av arbeidet. Teksten skal ordnes etter standard oppsett med tittelside, norsk og engelsk sammendrag, oppgavetekst, forord, innholdsfortegnelse, innledning, bakgrunn/teori, metode, resultater, diskusjon, konklusjon, referanser og vedlegg. Faglærer ønsker også at alle relevante filer fra arbeidet lagres på en strukturert måte for evt senere bruk i videreføring av prosjektet.

Trondheim, 15. august 2023



Bjørn Frengstad

Professor i ingeniørgeologi

Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU

**Figur 1.1:** Bilde av oppgaveteksten til denne masteroppgaven. Utarbeidet av hovedveileder Bjørn Frengstad.

## 2 Tidligere arbeid

### 2.1 Bergets respons på oppvarming

En rekke studier har blitt gjennomført der bergartsprøver varmes opp, for deretter å se hvilke effekter oppvarmingen har på prøvenes mekaniske egenskaper (Wong mfl. (2020), Nordlund mfl. (2014), Miskovsky og Saiang (2012)). Dette har blitt gjennomført fordi bergmassens oppførsel ved oppvarming vil kunne ha stor innvirkning på underjordiske konstruksjoner, f.eks. ved en brann inne i en tunnel. De fleste studiene har utsatt prøvene for høye temperaturer på opp til over 1000 °C. Her vil de ulike styrkeparameterne og deres variasjon være viktig ved design av sikre og økonomiske undergrunnsprosjekter (Wong mfl., 2020).

Det har lenge vært kjent at berggrunnen responderer når den utsettes for varme. Fyrsetting har blitt benyttet i mange hundre år, spesielt innen gruvedriften før dynamitten og kruttet kom. Prinsippet gikk ut på å bruke setteved for å lage et bål nærme fjellveggen. Varmen fra bålet gjorde bergmassen sprø og drivingen betraktelig enklere. Metoden benyttes da for å bryte opp fjellet. En stor utfordring ved denne metoden var manglende ventilasjon nede i gruvene. Grunnet et stort behov for setteved var avskoging i nærheten av gruvene en vanlig konsekvens (Rui, 2024).

#### 2.1.1 Litteraturstudie om tidligere laboratorieundersøkelser med oppvarming av prøver i det milde temperaturområdet

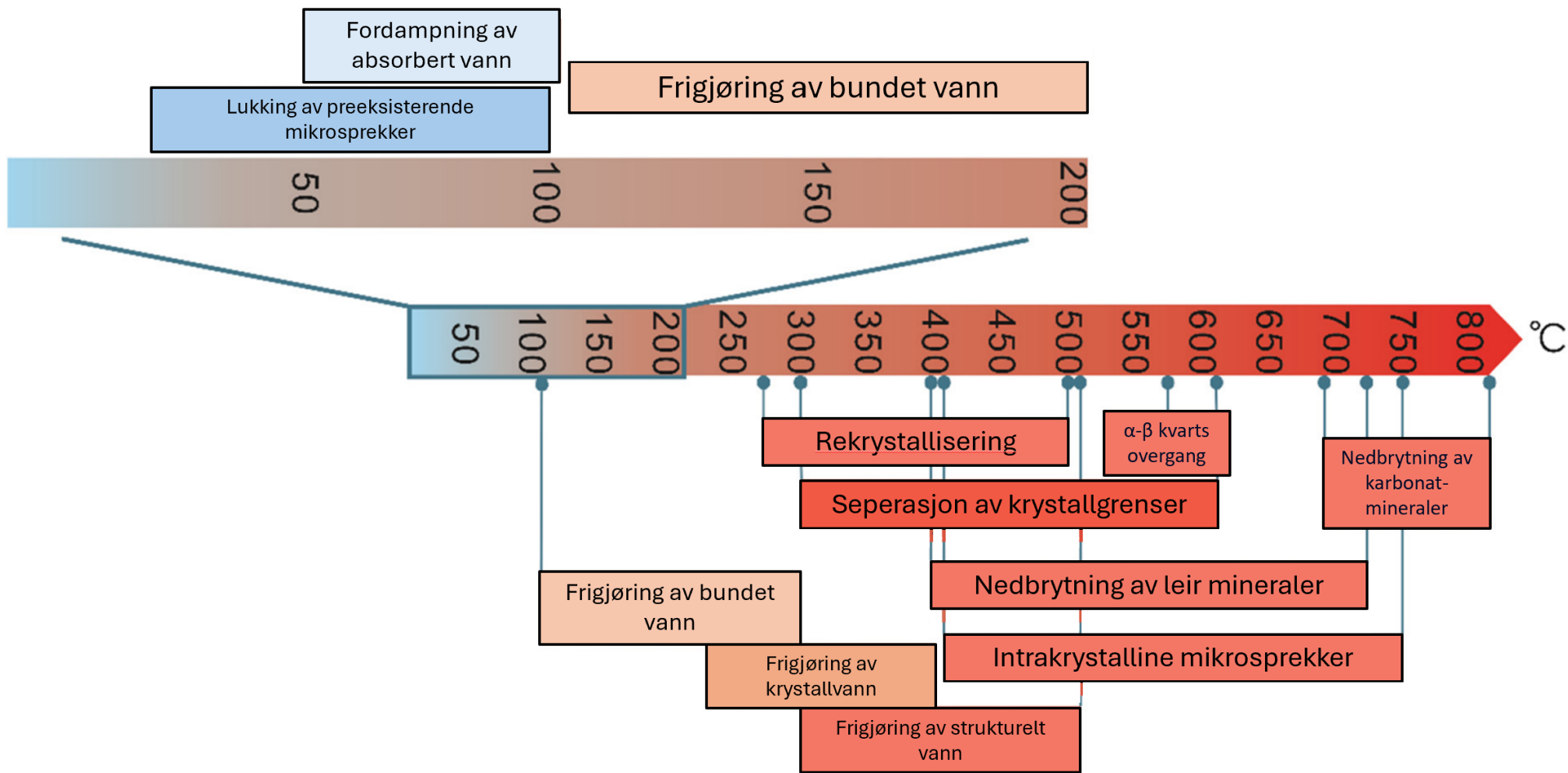
Wong mfl. (2020) har utført et litteraturstudie som samlet laboratorieresultater fra studier der oppvarmingen av prøvene ikke gikk til like høye temperaturer. En mildere temperaturutsetting av prøvene ble her studert siden det jevnt over er konstatert at bergarter blir mekanisk svakere ved utsetting for høye temperaturer. Studiet tar for seg oppvarming fra romtemperatur opp til 200 °C. I dette temperaturintervallet kan en økning i mekanisk styrke forekomme. Dette kan blant annet være et resultat av mineralenes utvidelse ved disse temperaturene, som fyller tomt porerom i bergarten. Tidligere studier viser også at det har vært liten variasjon i bergartsstyrken til prøver

varmet opp til 200 °C. Den tydelige reduksjonen fremkommer ved oppvarming opp til 300 - 400 °C. Ved 600 °C reduseres styrken signifikant og den mekaniske oppførselen til bergarten går fra sprø til duktil (Wong mfl., 2020).

For å finne årsaken til endring i mekanisk styrke ved temperaturøkning har mikrostrukturer sin utvikling i bergarten blitt studert. Dette har blant annet blitt gjort ved å overvåke den akustiske emisjonen (Wong mfl., 2020). Akustisk emisjonstesting er en nyttig metode for å undersøke deformasjonen til materialer som er utsatt for ytre påkjenninger. Metoden baserer seg på å gjenkjenne høyfrekvente elastiske bølger sendt ut når prøven deformeres, og deretter konvertere disse til elektriske signaler (Physical Acoustics, u.å.). En annen metode er å observere mikrosprekker i tynnslip ved å benytte et optisk mikroskop (Wong mfl., 2020). "X-ray micro CT scanning" der 3D bilder produseres kan også brukes for å studere mikrosprekkene (Micro Photonics Inc., u.å.).

Studier av mikrosprekker viser at de skyldes en av to hovedprosesser. Den første er dannelsen av nye sprekker som følge av mineraler sin utvidelse ved oppvarming eller utvidelse av forut eksisterende sprekker (Wong mfl., 2020). En bergart inneholder ofte mange ulike mineraler med ulik termisk utvidelse, noe som resulterer i en ujevn utvidelse i prøven. Dette vil bidra til at det dannes mikrosprekker ved korn grensene mellom de ulike mineralkornene. Dersom det skjer en anisotropisk utvidelse innad i mineralene, vil det kunne dannes mikrosprekker innad i kornene. Den andre hovedprosessen som danner mikrosprekker er når de termiske reaksjonene leder til strukturell kollaps av mineralene (Wong mfl., 2020).

Wong mfl. (2020) beskriver også forløpet av termisk skade på prøven som oppvarmes, se figur 2.1. Figuren viser de vanligste mekanismene som opererer ved en jevn temperaturendring og sakte oppvarmingsforhold.



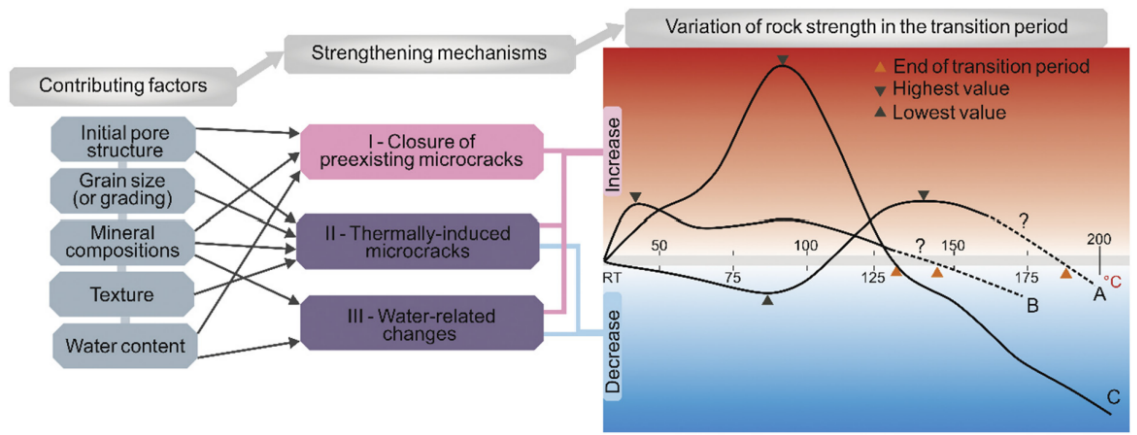
**Figur 2.1:** Fysiske prosesser som foregår i bergarter ved oppvarming opp til 800 °C. Modifisert fra Wong mfl. (2020).

Hvilke prosesser som foregår i bergarten avhenger av hvor mange °C den utsettes for, slik som figur 2.1 viser. Ved oppvarming til 200 °C vil den termiske påvirkningen innebære lukking av forut eksisterende mikrosprekker i prøven, absorbert vann i prøven vil fordampe og bundet vann i bergarten vil frigjøres. Rekrystallisering og tydelig svekking av bergartens styrke skjer som sagt ved høyere temperaturer. Det er tydelig at de største fysiske endringene innad i bergarten skjer ved høye temperaturer opp mot 800 °C. Selve rekrystalliseringen begynner fra rundt 275 °C frem til 500 °C. Det er rundt disse temperaturene og oppover at faseoverganger, dekomposisjon av mineraler og dannelsen av intrakrystalline mikrosprekker finner sted (Wong mfl., 2020).

Når en bergartsprøve gjennomgår en synlig deformering, er dette ofte et resultat av de små endringene i mikrostrukturene, slik som mikrosprekkene. To viktige parametere innen karakterisering av porestrukturen; permeabilitet og porøsitet, øker generelt ved høye temperaturer (Wong mfl., 2020).

Figur 2.2 viser variasjonen i bergartsstyrken ved temperaturøkning opp mot 200 °C (Wong mfl., 2020). Resultatet er basert på den generelle trenden til A-Indisk granitt (Dwivedi mfl., 2008), B-Biotittisk gneis (G. Chen mfl., 2014) og C-Khondalitt (Vishal mfl., 2011). Figuren viser at det både er styrkende og svekkende mekanismer som kan påvirke bergartsstyrken ved mildere oppvarming. En tydelig mekanisme som kun styrker bergarten, er lukkingen av forut eksisterende mikrosprekker. Dannelsen av termisk induserte mikrosprekker vil kunne ha en negativ innvirkning på styrken, men kan også virke positivt. Det samme gjelder for vannrelaterte endringer i prøven. Faktorer som bidrar til disse mekanismene er porestrukturen, kornstørrelsen, mineralkomposisjonen, teksturen og vanninnholdet i bergarten. A- den indiske granitten opplever en minskning av styrken ved oppvarming opp mot 100 °C. B- den biotittiske gneisen får en liten økning av styrken. Til slutt får C-khondalitten en kraftig økning i styrken opp mot 100 °C. Etter 100 °C øker bergartsstyrken til den indiske granitten. For den biotittiske gneisen og khondalitten fortsetter styrken å minke. Figur 2.2 viser altså en tydelig variasjon i bergartsstyrken ved oppvarming av ulike prøver. Merk at det ikke er spesifisert noen parameter eller skala for bergartsstyrken på y-aksen (Wong mfl., 2020).





**Figur 2.2:** Figur fra Wong mfl. (2020) med bergartsstyrken til A) Indisk granitt, B) Biotittisk gneis og C) Khondalitt ved oppvarming.

Litteraturstudiet av Wong mfl. (2020) omhandlet flere metoder benyttet for testing på oppvarmede kjerneprøver, både destruktive og ikke-destruktive. Kompressiv styrke, strekkstyrke, elastisitetsmodul og poissons forholdstall er parametere funnet ved destruktive metoder. Ikke-destruktive metoder er måling av tetthet, permeabilitet, porøsitet og ultralydhastighet. Noen studier tar for seg enkelte testmetoder, slik som denne analysen har gjort.

### 2.1.2 Oppvarming og pålastning av Beishan granitt i det milde temperaturområdet

Wang mfl. (2023) gjennomførte et studie der Beishan granitt ble utsatt for ulike kompresjonslaster ( $\sigma_3 = 0, 5$  og  $20$ ) og temperaturer ( $T = 25, 60$  og  $90$  °C). Studiet viste at ved lav temperaturøkning ville sprekker lukkes, og dette vil føre til større friksjonsstyrke og høyere stivhet. Det ble konkludert med at kohesjonen til prøvene minket som følge av svakere båndstyrke ved temperaturøkning. Friksjonsvinkelen økte derimot grunnet lukning av sprekker og porer (Wang mfl., 2023).

### 2.1.3 Bergartsprøver utsatt for sykliske temperaturendringer

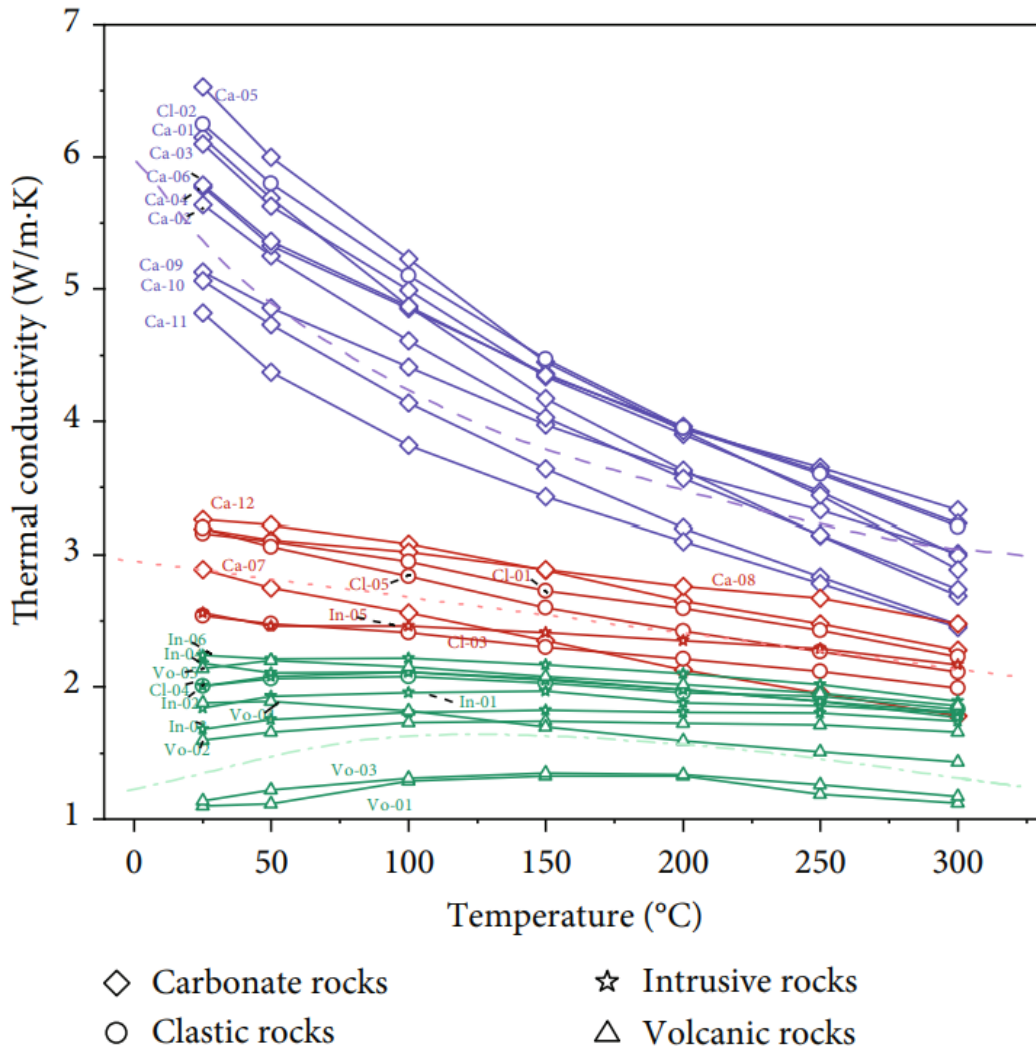
Waragai (2023) utsatte granitt, marmor og sandstein for 144 termiske sykluser med en oppvarming opp til  $84$  °C. Hensikten her var å se om de fysiske egenskapene

til disse bergartene ble påvirket av temperaturøkningene. Tre målemetoder ble benyttet for å evaluere prøvenes fysiske endringer: ”Leeb rebound hardness (LRH)”, ”Ultrasonic pulse velocity (UPV)” og ”Acoustic emissions (AE)”.

Resultatene viste at ”rebound” hardheten til prøvene ikke ble påvirket i noen stor grad, og at det ikke var noen systematisk sammenheng mellom de målte LRH verdiene og antallet termiske sykluser. Det ble likevel sett en liten reduksjon i hardheten til prøvene etter de sykliske temperaturendringene. Oppvarming- og avkjølingsraten her var på  $\pm 2$  °C/min (Waragai, 2023). UPV verdien til granitten og marmoren falt først for deretter å øke kraftig opp til 80 sykluser. Deretter holdt UPV-verdien seg stabil. Sandsteinen derimot hadde en liten økning ved de 10 første syklusene og deretter var verdien stabil. Dette skyldes trolig at porøsiteten i sandsteinen er høyere. Ved de første syklusene tydet AE signaler på dannelse av mikrosprekker i marmoren. I granitten ble det også registrert dannelse av sprekker fra AE signaler. Porevolumet i bergartene økte noe ved de termiske syklusene. Jevnt over tydet ikke AE signalene på store endringer i porestørrelsesfordelingen, og dermed minimal fysisk skade av bergartsprøvene. De tre typene bergarter viste ulik fysisk reaksjon ved oppvarmingene (Waragai, 2023).

#### **2.1.4 Varmedningsevnen til ulike bergartsprøver ved oppvarming**

C. Chen mfl. (2021) testet varmedningsevnen til oppvarmede bergartsprøver, ved blant annet 100 °C. Det ble testet på klastiske bergarter, karbonater, gangbergarter og magmatiske bergarter. Studiet estimerte effekten temperaturøkning hadde på varmedningsevnen til karbonater i Tarim bassenget i Nord-Kina. Basert på dette konkluderes det med at varmedningens påvirkning i stor grad avhenger av varmedningsevnen ved romtemperatur, slik som trendene i 2.3 viser.



**Figur 2.3:** Varmeledningsevnen til bergartene ved oppvarming (C. Chen mfl., 2021). Fargemarkeringene står for varmeledningsevnen ved romtemperatur. Blå markering gjelder for prøver med en varmeledningsevne på over 4.5 W/m<sup>2</sup>K og har den kraftigste reduksjonen. Rød markering gjelder prøver med en varmeledningsevne mellom 2.5 - 3.5 W/m<sup>2</sup>K, disse har en gradvis reduksjon. Grønn markerer en varmeledningsevne under 2.5 W/m<sup>2</sup>K, og disse viser en liten økning frem til 150 °C.

I studiet ble prøvene varmet opp til 300 °C og varmeledningsevnen ble målt med metoden TPS - "Transient Plane Source" (C. Chen mfl., 2021). Varmeledningsevnen ved romtemperatur til karbonatene og de klastiske bergartene er betydelig høyere enn for gangbergartene og de magmatiske bergartene. Den høyeste målte varmeledningsevnen til de første nevnte var på 6.15 W/m<sup>2</sup>K, mens for gangbergartene og de magmatiske bergartene var høyest verdi på 2.56 W/m<sup>2</sup>K.

Resultatene viste at varmeledningsevnen ble redusert hos karbonatene og de klastiske bergartene ved oppvarming, selv opp til kun 100 °C. De vulkanske- og gangbergartene opplevde en liten økning ved oppvarming til 100 °C (C. Chen mfl., 2021).

### **2.1.5 Varmekapasiteten til ulike bergartsprøver ved gjentatt oppvarming**

Becattini mfl. (2017) så på hvordan varmekapasiteten til seks alpine bergarter utviklet seg ved eksponering for temperaturer opp til 585 °C. De seks bergartene besto av en mafisk og en felsisk bergart, en kalkholdig sandstein, et kvartsrik konglomerat, en kalkstein og en serpentinit. Prøvene ble her utsatt for opptil 40 temperatursykluser, med en oppvarmingshastighet på 2.6 °C/min. Noen av prøvene gikk i oppløsning etter 20 oppvarminger. Dette gjaldt for kalksteinen, den kalkholdige sandsteinen og den felsiske bergarten.

Alle prøvene viste en reduksjon i den spesifikke varmekapasiteten, spesielt kalksteinen. Den åpne porøsiteten økte for alle prøvene ved utsettelse for de sykliske temperaturendringene. En økning på opp til 15-16 ganger så høy porøsitet ble registrert etter 40 oppvarminger hos den mafiske bergarten og kalksteinen (Becattini mfl., 2017).

Studiet konkluderer med at selv om varmekapasiteten til berggrunnen minker ved oppvarming, indikerer simuleringer at kapasiteten til lageret ikke blir betydelig redusert. Brudd går ofte langs foliasjonen i berggrunnen, der kalsitt og kvarts ekspanderer. Det er derfor ikke ønskelig med folierte bergarter rike på kalsitt og/eller kvarts hvis temperaturen er så høy som rundt 600 °C. Økningen i porøsitet vil heller ikke være ønskelig, siden det minker massens bruddstyrke under kompresjon. Derfor vil en bergart med lav porøsitet og lavest mulig økning i porøsiteten ved oppvarming være ønskelig (Becattini mfl., 2017).

## 2.2 Varmeledningsevne og termiske responstester i Trondheimsområdet

Varmeledningsevnen til berggrunnen spiller en stor rolle når det kommer til dimensjonering og plassering av en geotermos. Det vil innvirke på antallet og dybden til brønnene. Termiske responstester er en undersøkelse som kan gjennomføres for å undersøke berggrunnens termiske egenskaper. Den gir et godt bilde på forholdene ute i felt (Gehlin, 2002). Resultater fra tidligere termiske responstester i Trondheimsområdet vil være viktige data.

Asplan Viak har gjennomført en rekke termiske responstester i Trondheimsområdet de siste 10 årene. Rapporter fra testene viser den effektive varmeledningsevnen, den termiske borehullsmotstanden og den uforstyrrede temperaturen i grunnen. Se tabell 1 for en oversikt over de termiske responstestene som er gjennomført. Disse verdiene er basert på rapporter med utredning av Fosslia omsorgssenter (Eggebø mfl., 2020), Hommelvik (Ramstad, 2013c), Nettet varmeanlegg, Otto Nielsens vei 12 (Mørkved & Holmberg, 2016), Moholt Allé 9 (Ramstad mfl., 2020), Nardovegen 12-14 (Ramstad, Holmberg & Syljuåsen, 2021), Nyhavna testbrønner (Ramstad & Holmberg, 2020), Hegra barneskole (Riise, 2019), Saksvik (Eggebø, 2020), Heimdal vgs (Riise & Ramstad, 2016) og Solbakken skole (Ramstad, 2013b).

De termiske responstestene vist i tabell 1 viser jevnt over en egnet varmeledningsevne for etablering av en geotermos.

Område	Dato	Uforstyrret	Effektiv varme-	Termisk borehulls-
		temperatur	ledningsevne	motstand
		[°C]	[W/m*K]	[m*K/W]
Fosslia omsorgssenter	2020	8.6	3.8	0.075
Hommelvik	2013	7.7	4.2	0.10
Nesset varmeanlegg	2019	8	3.4	0.07
Otto Nielsens vei 12	2016	7.35	4.0	0.10
Moholt Allé 9	2020	7.6	4.5	0.08
Nardovegen 12-14	2021	8.7	4.0	0.08
Nyhavna testbrønn 1	2020	8.6	4.2	0.075
Nyhavna testbrønn 2	2020	8.55	4	0.065
Hegra barneskole	2019	8.24	3.7	0.075
Saksvik	2020	8.2	3.9	0.09
Heimdal vgs	2016	7.5	3.8	0.095
Solbakken Skole	2013	7.62	3.8	0.075

**Tabell 1:** Tabell over ulike termiske responstester gjennomført av Asplan Viak i Trondheimsområdet ((Eggebø mfl., 2020), (Ramstad, 2013c), (Holmberg & Tønnesen, 2019), (Mørkved & Holmberg, 2016), (Ramstad mfl., 2020), (Ramstad, Holmberg & Syljuåsen, 2021), (Ramstad & Holmberg, 2020), (Riise, 2019), (Eggebø, 2020), (Riise & Ramstad, 2016) og (Ramstad, 2013b).)

## 3 Teori

### 3.1 Grunnvarme

Utnyttelsen av grunnvarme ble introdusert på slutten av 1970-tallet først og fremst i Sverige. Hovedformålet var da hente ut lagret solvarme fra berggrunnen for å benytte den til bygningsoppvarming på vinterstid ved hjelp av varmepumper. Idag brukes grunnvarme til både oppvarming på vinterstid og nedkjøling på sommerstid (Gehlin, 1998). Det er mulig å ikke kun ta opp varme, men også lagre varme i slike grunnvarmeanlegg (Ramstad, 2011).

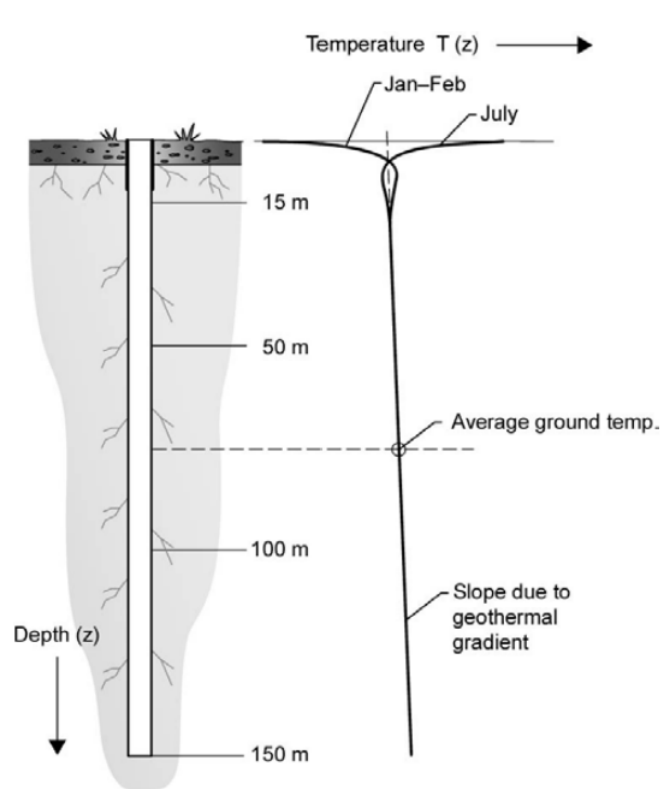
Det er flere ulike undergrupper når det kommer til grunnvarme, avhengig av mediumet som den termiske energien lagres i. I denne masteroppgaven vil det kun fokuseres på grunnvarme der berggrunnen er mediumet, da ved boring av energibrønner som tilfører energi. Dette kalles BTES - "Borehole Thermal Energy Storage" (Gehlin, 1998).

Å inkorporere grunnvarme som en energikilde i dagens samfunn vil gi en mer sikker og miljøvennlig energiforsyning. Det vil lede til en reduksjon i mengden kjøpt strøm til bygningsoppvarming med rundt 70 % (Ramstad, 2011). Også under kalde vinterdager, vil grunnvarme i motsetning til en luft-til-luft varmepumpe, kunne dekke dette energibehovet. Den maksimale belastningen på strømmettet på de kaldeste dagene vil dermed bli vesentlig lavere dersom grunnvarme benyttes (Ramstad, 2011).

#### 3.1.1 Temperaturen i grunnen

Temperaturen i grunnen ligger ofte 1-2 °C over årsmiddel av lufttemperaturen i området (Ramstad, 2011). Fra overflaten ned til 20 metersdyp vil temperaturen i grunnen avhenge av årstiden. Temperaturen dypere ned i bakken vil være mer stabil og blant annet avhenge av den geotermiske gradienten i området (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-b). Ved økende dybde vil den uforstyrrede temperaturen i grunnen øke grunnet den geotermiske gradienten, se figur 3.1 (Gehlin, 2002). Temperaturen

i grunnen vil ha størst betydning for brønner der det kun tas varme ut fra grunnen. Det er ikke av like stor betydning ved energilagring i grunnen, der varme tilføres (Ramstad, 2011). I størrelsesorden vil det ofte være mellom 5 °C til 7 °C i grunnen i lavlandet i Sør-Norge (Hofstad, 2019).



**Figur 3.1:** Temperaturøkningen ved økt dybde ned i grunnen som følge av den geotermiske gradienten hentet fra Gehlin (2002).

Jordkloden har en stor mengde varme lagret i de ulike lagene, helt fra den indre kjernen ut til jordskorpen. Denne lagrede varmen er fra akkresjonen som skjedde under jordens dannelse og nedbrytning av radioaktivt materiale (Alva mfl., 2018). Når det er snakk om utnyttelse av grunnvarme, omhandler dette hovedsaklig oppvarming som følge av solenergi. En liten del av oppvarmingen skyldes nedbrytning av radioaktive grunnstoffer (Ramstad, 2011).

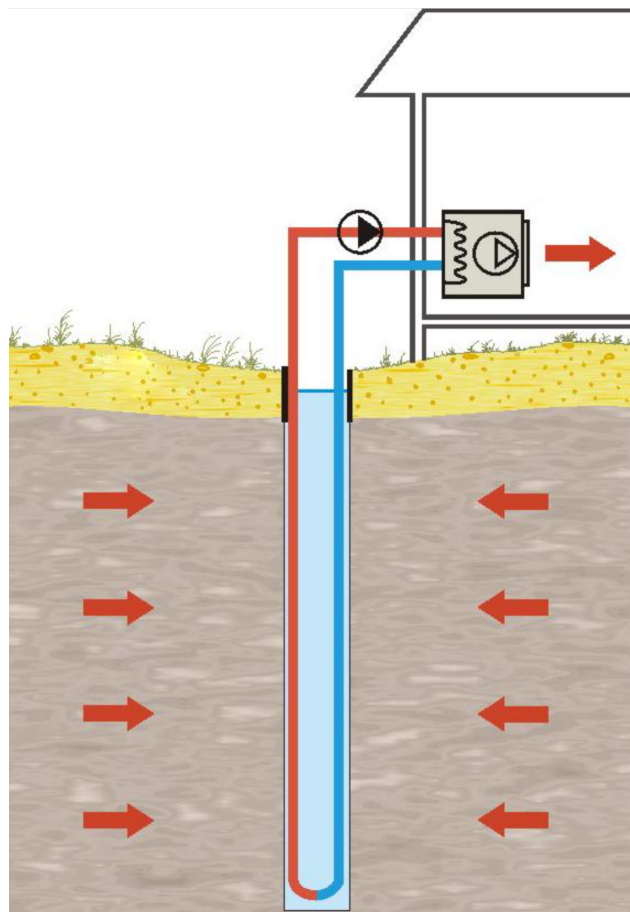
### 3.1.2 Energibrønner

BTES innebærer boring av energibrønner i berggrunnen (Gehlin, 1998), og her finnes det to ulike systemer, åpne- og lukkede (Ramstad, 2011).



### Lukket system

Et lukket system er den mest benyttede løsningen siden den er mest robust. Se illustrasjon av et lukket system i figur 3.2. Denne metoden omhandler en kollektorslange av plast som blir lagt ned i den borede brønnen. Disse kollektorslangene er fylt med væske som går ned i brønnen. Energiutvekslingen vil da være mellom væsken som går i kollektorslangen og berggrunnen (Ramstad, 2011).



**Figur 3.2:** Figuren viser et lukket system (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-b). Her brukes en U-formet kollektorslange med kollektorvæske til å utnytte varmen fra grunnen.

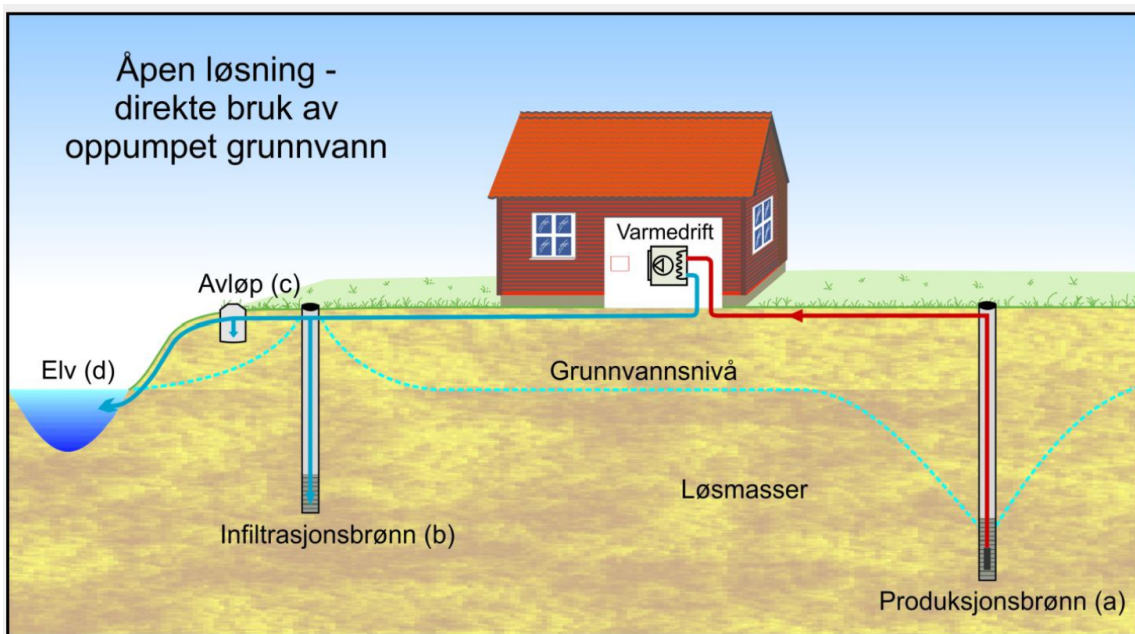
Energi- og effektuttaket skjer i den vannfylte delen av borehullet, altså under grunnvannsspeilet (Ramstad, 2011). Denne sonen betegner den aktive lengden. Dybden til en slik brønn varierer vanligvis mellom 100 til 250 meter, med en diameter fra 11,5 til 13,9 cm. Prisen på å bore en brønn avhenger sterkt av

grunnforholdene. Boring i fast fjell har en pris på rundt 150 til 250 kr per meter, i tillegg kommer merverdiavgift. I løsmasser vil boringen koste 3 til 5 ganger så mye, grunnet behovet for foringsrør i stål. De fleste stedene i Norge er løsmassedekket tynt, noe som er fordelaktig når det kommer til boring av slike brønner. En fordel ved et lukket system er at borehullet og kollektorslangene har en lang levetid. Løsningen er også driftsikker og kan tilpasses alle anleggsstørrelser. Investeringskostnaden er derimot høy (Ramstad, 2011).

### Åpent system

De åpne systemene vil som navnet indikerer innebære et åpent system der grunnvannet benyttes. Se figur 3.3 for illustrasjon av systemet (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-e). Grunnvannet vil da pumpes opp og det er her energien hentes. Dette er en ønsket metode dersom forholdene er egnet i det tenkte området for etablering. Her vil energiuttaket avgjøres både ut ifra temperaturen til det oppumpede vannet og mengden vann (Ramstad, 2011).

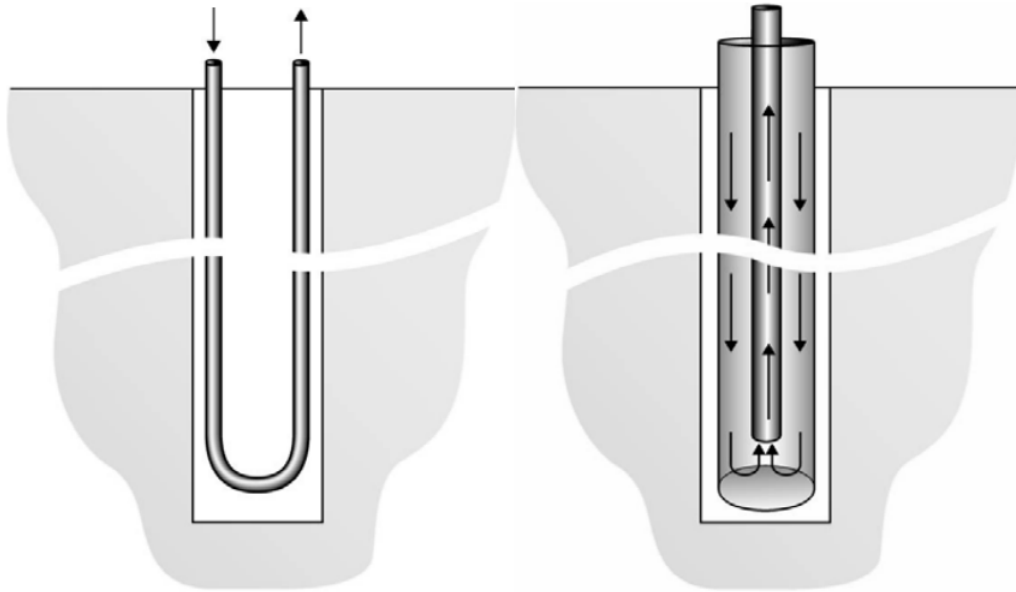
Den høyeste kapasiteten innen grunnvannsbrønner er i avsetninger med sand og grus (Ramstad, 2011). Denne løsningen krever detaljerte hydrogeologiske forundersøkelser som kan ta opp til et års tid. Dette fordi at det kan være nødvendig med en prøvepumping periode gjennom alle årstider. Grunnvannskvalitet er et av forholdene som undersøkes før oppstart, siden dette vil kunne ha innvirkning på driften av anlegget. Temperaturen, egnetheten og mengden av grunnvann for uttak er også parametre som er nødvendig å klarlegge før en eventuell oppstart. Når det kommer til brønndybde og brønndiameter, har disse brønnene vanligvis en dybde på 10 til 40 meter og en diameter på 15 til 35 cm (Ramstad, 2011).



**Figur 3.3:** Figuren viser et åpent system (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-e). Grunnvannet i produksjonsbrønnen blir pumpet opp og ført til varmepumpen, der blir varmen fra vannet utnyttet. Deretter blir vannet tilbakeført til grunnen i en infiltrasjonsbrønn, eller ut i et vassdrag eller i et avløp (Ramstad, 2011).

### 3.1.3 Type kollektorslange i borehullet

Det er to ulike muligheter for å kunne hente varme ut fra borehullet ved et lukket system (Gehlin, 2002). Begge involverer å legge kollektorrør ned i borehullet, den ene en U-kollektor og den andre et koaksialt rør. Se figur 3.4 for illustrasjon av de to ulike kollektorene. Ved en U-kollektor blir det lagt et rør ned i borehullet som har en U-form nederst. Ved et slikt design vil det strømme væske ned igjennom det ene røret og opp igjennom det andre. Utveksling av varme mellom kollektoren og grunnen skjer i begge disse rørene. Det er vanligst å kun ha én U-kollektorslange ned i borehullet, men det er mulig å ha to. Interessen for å legge dobbel U-kollektorslange har økt ved dype energibrønner, grunnet lavere termisk resistanse og et lavere trykktap. I den koaksiale kollektoren befinner det seg et rør inne i et rør. Da vil enten vannstrømmen gå ned igjennom det ytterliggende røret og opp igjennom den innerste røret, eller motsatt. Kollektorvæsken sin strømningsvei vil være avhengig av om det skal hentes ut eller tilføres energi til borehullet (Gehlin, 2002).

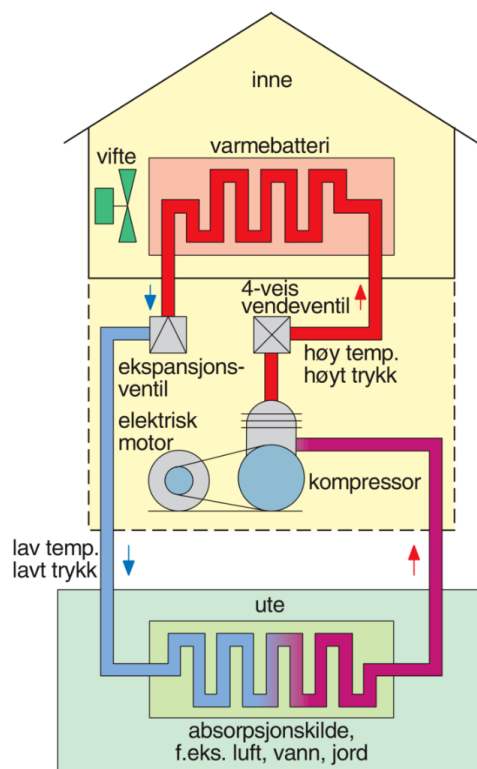


**Figur 3.4:** De to ulike kollektorslangene, U-kollektor (venstre) og koaksial kollektor (høyre) hentet fra Gehlin (2002).

### 3.1.4 Varmepumper - for å heve temperaturen

For å kunne utnytte varmen hentet opp fra en energibrønn må en varmepumpe benyttes. Varmepumpen hever temperaturen for å gjøre den egnet til bygnings- og tappevanns oppvarming (Ramstad, 2011).

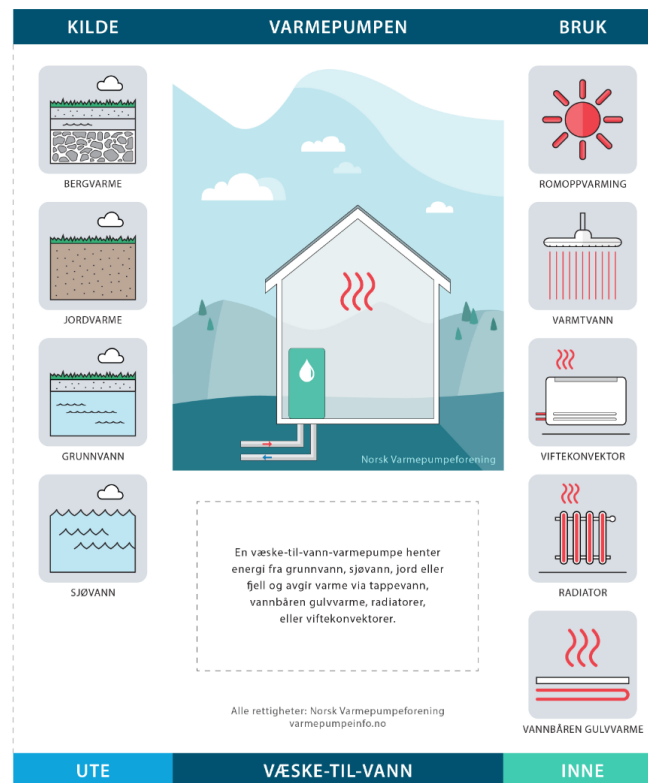
En varmepumpe består av en fordampner, en kompressor, en kondensator og en ekspansjonsventil. Se figur 3.5 for en prinsipptegning av en varmepumpe (Hofstad, 2023). Når fluidet blir komprimert, øker temperaturen. Det er denne oppvarmingen som gjør varmen utvunnet av energikilden egnet til f.eks. romoppvarming. Når fluidet ekspanderer fører dette til at fluidet kjøles ned. Overføringen av varme blir da mulig ved at fluidet inngår i en krets med vekselvis ekspansjon og kompresjon (Hofstad, 2023).



**Figur 3.5:** En prinsippskisse av en varmepumpe (Hofstad, 2023).

Det er vanligst å bruke en væske-vann varmepumpe (Ramstad, 2011). En væske-vann varmepumpe vil gi størst energibesparelse sammenlignet med andre varmepumper (Varmepumpeforeningen, 2023). Driftsbetingelsene for denne typen varmepumpe er gode siden temperaturen i berggrunnen og grunnvannet holdes relativt stabilt igjennom året (Ramstad, 2011). Det er ikke bare varme fra berg, løsmasser eller grunnvann som kan benyttes ved en væske-vann varmepumpe, sjøvann kan også benyttes (Varmepumpeforeningen, 2023). De ulike energikildene og bruksområdene er illustrert i figur 3.6.

Effektuttaket fra en væske-vann varmepumpe er stort i forhold til strømmen den krever. Den produserer hele 3-4 ganger mer varme enn den strømmen den krever kunne ha produsert (Varmepumpeforeningen, 2023). For å kunne bruke varmen til oppvarming vil det være nødvendig å ha radiatorer, viftekonvektorer eller vannbåren gulvvarme i husholdningen (Ramstad, 2011).



**Figur 3.6:** Illustrasjon av mulige energikilder og bruksområdet ved en væske-vann varmepumpe (Varmepumpeforeningen, 2023).

### 3.1.5 Grunnvannets betydning

Hvor grunnvannsnivået ligger vil ha stor betydning for effekten av energibrønnen. Grunnvannsnivået vil være en av faktorene som avgjør brønnens nødvendige dybde for det gitte varmebehovet. Dette fordi at overføringen av varme i mellom borehullsveggen og kollektorslangen skjer kun i den vannfylte delen av borehullet under grunnvannsnivået (Varmepumpeforeningen, 2024). Denne lengden under grunnvannsnivået betegnes som den aktive lengden til energibrønnen. I gjennomsnitt er grunnvannsnivået i Norge mellom 1 til 10 meter under terrenget (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-b). Det er av betydning siden varmen som hentes ut fra grunnen ikke kun kommer fra solvarme lagret i berggrunnen og jorden, men også i grunnvannet (Ramstad, 2011).

Dersom man ønsker å lagre varme i grunnen, vil grunnvannets bevegelser være av betydning. Dersom energibrønnene treffer vannførende sprekker vil dette kunne være med på å føre varme vekk fra eller til lageret. Det vil være ønskelig med stillestående

vann ved energilagring, slik at varmen som føres ned i brønnen ikke går tapt med grunnvannet i bevegelse. Ved kun uttak av energi vil høy grunnvannsstrømning kunne være gunstig, siden det da kontinuerlig tilføres varme (Ramstad, 2011).

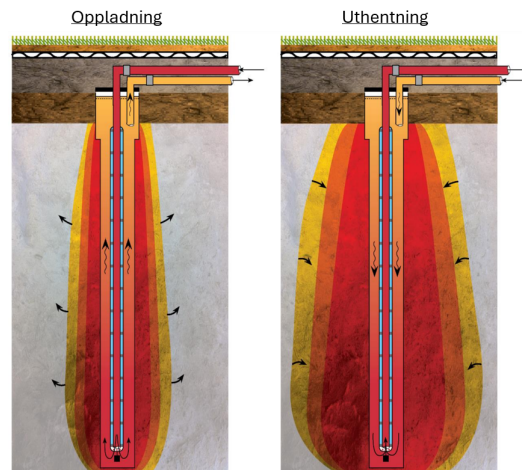
### 3.1.6 Dimensjonering av større anlegg

Dimensjonering av større anlegg vil gjøres på grunnlag av blant annet berggrunnens termiske egenskaper og det ønskede energiuttaket. Antall brønner og deres lengde vil være faktorer under denne dimensjoneringen. Det anbefales å heller bore litt lengre brønner enn planlagt i forhold til energiuttaket for å sikre at tilførselen er tilstrekkelig. Konsekvensene ved underdimensjonering er større enn ulempen med en litt høyere investeringskostnad. Litt dypere brønner vil heller ikke medføre en mye høyere investering (Ramstad, 2011).

Det kan være betydelige forskjeller mellom de termiske egenskapene til samme type bergart ved ulike lokasjoner, derfor er det viktig å utføre lokale tester ved etablering av større grunnvarmeanlegg. Dette vil blant annet innebære boring av testbrønn og gjennomføring av termisk responstest. Berggrunnsprøver kan også samles inn for videre undersøkelse av mineralkomposisjonen (Gehlin, 1998).

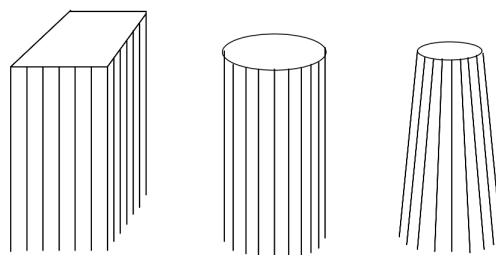
### 3.1.7 Høytemperatur sesongvarmelager

Et høytemperatur sesongvarmelager (HT-BTES) omhandler tilføring og lagring av varme i borehull i grunnen (Ramstad, Holmberg, Fosbakken mfl., 2021). En slik løsning åpner opp muligheten for å lagre restvarme som kan benyttes når det er behov. Det første etablerte høytemperatur sesongvarmelageret i berggrunn var i Sverige på 1980-tallet (Malmberg mfl., 2018). Ved tilføring av energi øker grunnens temperatur, og ved uthenting synker temperaturen (Nordell, 1994). Tilføringen skjer ofte i løpet av vår og sommer sesongen, mens uthentningen foregår under vinteren (Ramstad & Holmberg, 2022). Illustrasjon av oppladning og uthentning av energi fra en energibrønn kan ses i figur 3.7 (Nordell mfl., 2015). Ulike energikilder kan benyttes for å tilføre energi til lageret, eksempelvis solenergi eller overskuddsvarme i sommerhalvåret.



**Figur 3.7:** Illustrasjon av tilføring og uthentning av energi fra borehullet. Her er en koaksial kollektor benyttet. Illustrasjonen er hentet fra Nordell mfl. (2015) og er noe modifisert.

Ved etablering av et høytemperatur sesongvarmelager vil en minimumsstørrelse være nødvendig (Ramstad & Holmberg, 2022). I størrelsesorden vil et varmelager kunne omhandle flere hundre energibrønner. Dersom energibehovet er der, vil det være fordelaktig med et så stort lager som mulig for å gjøre forholdet mellom lagerets volum og lagerets overflate så stort som mulig. Slik at varmetapet fra de ytterste brønnene til omgivelsene minimeres. Da blant annet i forhold til investeringskostnad (Ramstad & Holmberg, 2022). Mulige design av et sesongvarmelager kan ses illustrert i figur 3.8 (Nordell, 1994).



**Figur 3.8:** Mulige design av et sesongvarmelager i grunnen hentet fra Nordell (1994). Her representerer linjene borehull.

Temperaturutviklingen i lageret over flere sesonger kan typisk se slik ut som figur 3.9 illustrerer (Ramstad & Holmberg, 2022). Over flere ladesesonger vil altså temperaturen i lageret bli høyere og dekke større deler av lageret.





**Figur 3.9:** Mulig temperaturutvikling i lageret over flere sesonger hentet fra Ramstad og Holmberg (2022). Illustrasjonen viser hvordan temperaturen blir høyere i større deler av lageret etter flere ladesesonger, og synker etter at varme er tatt ut. Eksempelet viser et tverrsnitt gjennom brønnene i et sirkulært lager (Ramstad & Holmberg, 2022).

Dimensjonering av et slikt anlegg kan gjøres ved å benytte programvaren EED - "Earth Energy Designer" (Ramstad, Holmberg, Fossbakken mfl., 2021). Ved et sesongvarmelager viser Malmberg mfl. (2018) at sirkulasjonspumpenes operative energi var høyere ved benyttelse av en dobbel U kollektorer sammenlignet med en koaksial kollektor.

## 3.2 De tre varmeoverføringsmekanismene

Varme betegner overføringen av energi fra et sted til et annet som følge av en temperaturgradient. Energien vil alltid gå fra der det er høy temperatur til der det er lavere temperatur (Pedersen, 2023). Det finnes tre ulike mekanismer for varmeoverføring, stråling, konveksjon og konduksjon.

### Stråling

Stråling definerer overføringen av varme mellom to systemer ved energi i form av bølger (Pedersen, 2021). Eksempelvis solen som overfører varme til jorden ved elektromagnetisk stråling (Engvold, 2023).

### Konveksjon

Konveksjon omhandler energioverføring ved forflyttelsen av energi i form av en strøm, enten i flytende- eller gassfase (Pedersen, 2018). Et eksempel på konveksjon er bevegelsene i mantelen der den varme massen stiger og den kalde massen synker (Fossen, 2017).

### Konduksjon

Konduksjon også kalt varmeledning definerer varmeoverføring igjennom et materiale ved en temperaturgradient innad i materialet (Ormestad mfl., 2022). Mer informasjon om varmeledningsevne kommer i neste delkapittel.

### 3.3 Varmedningsevne

Varmedningsevne definerer et materiale sin evne til å overføre varme ved konduksjon (Palacios mfl., 2019). Spesifikt omhandler det tiden det tar å overføre varme igjennom tverrsnittsarealet til materialet. Vinkelrett på dette tverrsnittsarealet eksisterer det en temperaturgradient. I følge denne definisjonen kan varmedningsevnen beregnes ut ifra Fourier's lov, dersom materialet er antatt homogent og isotropt. Varmebølgene vil ikke ha en spesifikk retning i dette tilfellet (Palacios mfl., 2019).

Fourier's lov er gitt ved Palacios mfl. (2019) i formel 1.

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad [-] \quad (1)$$

- $Q$  = Varmebølge raten til den termiske konduksjonen (W)
- $\lambda$  = Materialets termiske konduktivitet (W/m\*K)
- $A$  = Tverrsnittsarealet ( $m^2$ )
- $dT$  = Prøvens differentielle temperatur (K)
- $dx$  = Prøvens differentielle tykkelse (m)

For å gi en indikasjon på ulike materialers varmedningsevne se tabell 2 (Ormestad mfl., 2022). Eksempelvis er varmedningsevnen til is betraktelig høyere enn for vann. Igjen er varmedningsevnen til vann høyere enn for tørr luft (Ormestad mfl., 2022). Derfor vil graden av vannmetning og temperaturforholdene være innvirkende faktorer på et materiale sin varmedningsevne.

<u>Materiale</u>	<u>Varmeledningsevne [W/m*K]</u>
Vann	0.6
Tørr luft	0.02
Is	2
Sølv	420
Kobber	400
Gull	315
Stål	50

**Tabell 2:** Typiske verdier for varmeledningsevnen til ulike materialer (Ormestad mfl., 2022).

### 3.3.1 Innvirkende faktorer på varmeledningsevnen

Studiet Palacios mfl. (2019) har sett på en rekke faktorer som har innvirkning på varmeledningsevnen. De finner at kornstørrelsen til materialet vil kunne påvirke varmeledningsevnen, siden korngrensene kan være med på å hindre varmeoverføringen. Derfor vil større korn medføre høyere varmeledningsevne og motsatt. Videre finner de at porøsitet vil ha en negativ innvirkning på varmeledningsevnen. Dersom porøsiteten er høy vil varmeledningsevnen bli lavere enn i fast materiale. Det er viktig å merke at det ikke er kun porøsiteten som spiller inn, men porenes spesifikke form, fordeling, størrelse og grad av forbindelse til hverandre. Dette bekreftes også av Sundberg (1991).

I følge Palacios mfl. (2019) vil tetthet også ha en stor innflytelse, høy tetthet vil være en fordel dersom ønsket er en høy varmeledningsevne. Det vil altså være fordelaktig med et tettest mulig materiale med liten porøsitet. Når det gjelder krystallstrukturen til materialet vil den påvirke varmeledningsevnen, særlig dersom krystallsystemet er anisotropisk. Stor anisotropi i strukturen vil redusere materialets varmeledningsevne. Ved for eksempel et kubisk krystallsystem som er isotropisk, vil krystallenes orientering ikke ha noen innvirkning. Også urenheter i materialet vil minske varmeledningsevnen til materialet, dette er da relatert til den kjemiske komposisjonen til materialet (Palacios mfl., 2019).

Vanninnholdet vil kunne påvirke varmeledningsevnen dersom materialet er porøst. Grunnet at varmeledningsevnen til luft er betydelig lavere enn for vann, vil vannfylte porerom være fordelaktig (Sundberg, 1991). Se tabell 2 for varmeledningsevnen til vann, tørr luft og is (Ormestad mfl., 2022).

### 3.3.2 Bergarter sin varmeledningsevne

Ulike mineraler har ulik varmeledningsevne, grunnet blant annet krystallstruktur som nevnt ovenfor. Derfor vil den mineralogiske sammensetningen være av betydning for en bergart sin varmeledningsevne. I sedimentære bergarter vil porøsiteten og vannmetningsgraden være av stor betydning for varmeledningsevnen. Når det kommer til magmatiske- og metamorfe bergarter vil mineralsammensetningen være viktigst (Sundberg, 1991). Mineraler med en enkel kjemisk oppbygning vil ha en høyere varmeledningsevne (Palacios mfl., 2019).

Ulike mineralers varmeledningsevne basert på verdier hentet fra Clauser og Huenges (1995) kan ses i tabell 3. Dersom det antas homogene og isotrope forhold, vil en relativt høy nøyaktig teoretisk varmeledningsevne til bergmassen kunne regnes ut teoretisk. Denne utregningen vil da være basert på kvantiteten av ulike mineraler og deres tilhørende varmeledningsevne (Sundberg, 1988).

Mineral	Varmeledningsevne [W/m*K]
Albitt	1.95 - 2.34 (2.16)
Biotitt	1.7 - 3.14 (3.08)
Diamant	545.3
Diopsid	4.18 - 4.97 (4.44)
Epidot	2.48 - 3.04 (2.84)
Hornblende	2.4 - 3 (2.84)
Kalsitt	3.16 - 5.0 (3.92)
Kloritt	1.88 - 5.92 (4.48)
Kvarts	6.15 - 11.3 (8.36)
Magnetitt	4.19 - 9.7 (6.47)
Mikroklin	2.04 - 2.57 (2.26)
Muskovitt	2.21 - 3.89 (3.08)
Pyritt	19.21 - 37.9 (26,75)

**Tabell 3:** Oversikt over verdier for varmeledningsevnen til ulike mineraler basert på data hentet fra Clauser og Huenges (1995).

Det er stor variasjon når det kommer til varmeledningsevnen til berggrunnen, selv for bergarter av samme type (Sundberg, 1991). Mineralinnholdet til like bergarter kan variere sterkt avhengig av opphavssted. Eksempelvis kan kvartsinnholdet i en granitt i Oslo-området variere sterkt fra en granitt i Midt-Norge. Denne variasjonen i kvantiteten av de ulike mineralkomponentene er en av årsakene til at varmeledningsevnen til en type bergart ikke er uniform. Variasjon i den aktuelle berggrunnens porøsitet, vannmetning, temperaturutsettelse, anisotropi og tetthet er faktorer av stor betydning (Sundberg, 1991). Tabell 4 basert på Sundberg (1991) viser faktorenes grad av innvirkning. Oppsprekning i bergmassen vil også kunne ha en innvirkende effekt på varmeledningsevnen, spesielt regionale sprekkesett (Sundberg, 1988).

Faktor	Innvirkning på berggrunnen
Vanninnhold	Liten
Porøsitet	Liten
Mineralsammensetning	Veldig stor
Temperatur	Stor
Anisotropi	Liten til stor

**Tabell 4:** Ulike faktorer sin innvirkning på varmeledningsevnen til berggrunnen, basert på Sundberg (1991). Merk at temperaturinnvirkningen er stor når det gjelder et stort temperaturområde (Sundberg, 1991).

Temperaturendringer vil kunne påvirke varmeledningsevnen til bergarter. Tidligere studier viser hvordan varmeledningsevnen endrer seg som følge av temperaturøkning, se 2.1.4 (C. Chen mfl., 2021). Sundberg (1988) viser til at ved økt temperatur vil krystallinske bergarters varmeledningsevne synke med rundt 10%/100 °C. Is har en fire ganger så høy varmeledningsevne sammenlignet med vann, se tabell 2 (Ormestad mfl., 2022). Derfor vil en lav temperatur der porerom fylt med vann fryses til is kunne være fordelaktig for bergets varmeledningsevne (Sundberg, 1991).

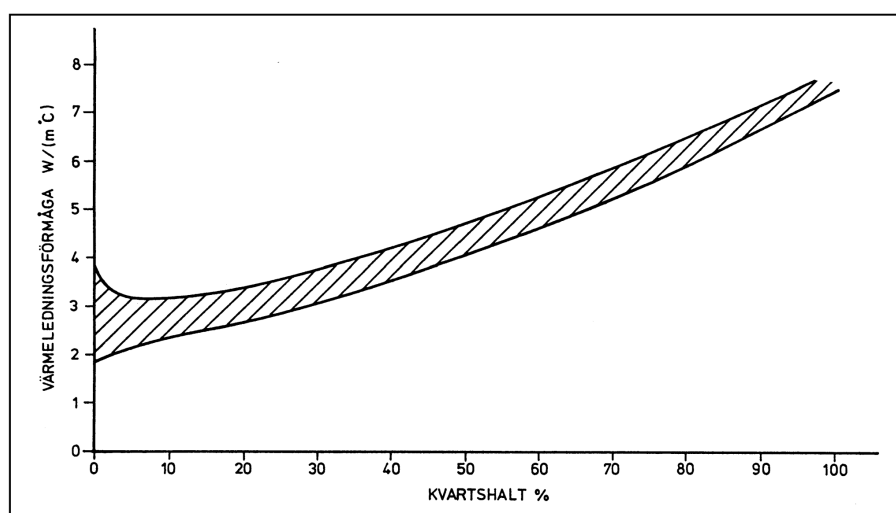
En rekke laboratoriemålinger av ulike bergarter i Norge viser at varmeledningsevnen vanligvis ligger mellom 2 til 4 W/m\*K (Ramstad, 2011). En samling av ulike bergarters varmeledningsevne basert på tidligere undersøkelser hentet fra Sundberg (1988) kan ses i tabell 5. Det er tydelig her at kvartsitt har en mye høyere varmeledningsevne enn de andre bergartene nevnt i tabell 5. Les mer om kvartsinnholdets sin betydning for varmeledningsevnen i delkapittel 3.3.3.

Bergart	Antall observasjoner	Varmeledningsevne [W/m*K]
Granitt	848	2.85 - 4.15
Granodioritt	255	2.85 - 3.85
Gneis	227	2.70 - 4.40
Kvartsitt	32	5.35 - 8.10
Metamorfe sedimentære bergarter	192	2.45 - 4.90
Porfyritt	59	1.70 - 3.60
Ryolitt	119	2.70 - 4.20
Syenitt	188	2.15 - 3.25

**Tabell 5:** Ulike bergarteres varmeledningsevne basert på Sundberg (1988).

### 3.3.3 Kvarts sin betydning for varmeledningsevnen

Kvarts er det bergartsdannende mineralet med høyest varmeledningsevne, og vil derfor ha betydelig innvirkning på berggrunnens evne til å overføre varme (Sundberg, 1991). Se figur 3.10. Kvartsmengden er avhengig av blant annet bergartstype og opprinnelsessted. Kvarts har en varmeledningsevne på mellom 6 og 11 W/m\*K (Clauser & Huenges, 1995).



**Figur 3.10:** Relasjonen mellom varmeledningsevnen (W/m°C) til et materiale og kvartsinholdet (%) i en krystallinsk bergart hentet fra Sundberg (1991).



### 3.4 Varmekapasitet

For å heve temperaturen til et materiale med en grad Kelvin kreves en viss mengde varme. Denne mengden varme benevnes som varmekapasiteten til materialet (Helseth, 2023).

Varmekapasitet er definert ved formel 2 hentet fra Helseth (2023).

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad [J/K] \quad (2)$$

- C = Varmekapasiteten
- Q = Varme tilført (Joule J)
- T = Temperatur (Kelvin K)

Det finnes også en definisjon for den spesifikke varmekapasiteten, der verdien avhenger av materialets masse (Helseth, 2023).

Den spesifikke varmekapasiteten er definert ved formelen 3 hentet fra Helseth (2023).

$$C_m = \frac{C}{m} \quad [J/(K * kg)] \quad (3)$$

- $C_m$  = Den spesifikke varmekapasiteten
- C = Varmekapasiteten
- kg = massen til materialet

### 3.5 Termisk responstest

En termisk responstest (TRT) gjennomføres ute i felt for å finne *in situ* varmeledningsevne i borehullet (Liebel, 2012). Se oppsettet av en slik test i figur 3.11.



**Figur 3.11:** Bilde av oppsettet ved gjennomføring av en termisk responstest av et borehull (Båsum Boring, 2012).

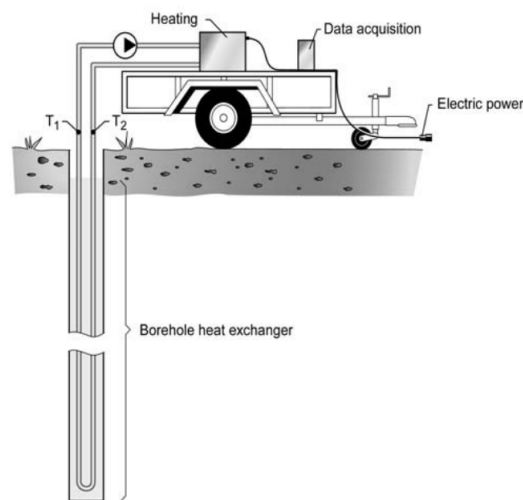
Det er en kostbar test som i hovedsak gjennomføres i sammenheng med etablering av større brønnparker. Vanligvis varer en termisk responstest i 72 timer (Liebel, 2012). To viktige faktorer ved dimensjoneringen av en geotermos blir besvart ved en slik test, den effektive varmeledningsevnen og den termiske borehullsmotstanden (Ramstad, 2013a). Fordelen ved en slik test sammenlignet med innhenting av prøver for laboratorieundersøkelser, er at det gir et bedre bilde av de faktiske forholdene ute i felt (Gehlin, 2002).

For å kunne analysere resultatene fra en termisk responstest vil det være nødvendig å måle den uforstyrrede temperaturen i berggrunnen (Ramstad, 2013a). Denne målingen gjøres før den termiske responstesten gjennomføres ved å benytte det oppkoblede utstyret. Kollektorvæske sirkulerer i borehullet ved en lav hastighet og temperaturen på inn- og utgående væske måles. Denne målingen har en varighet på 10 til 15 minutter (Ramstad, 2013a). Dette er viktig i forhold til å kunne bruke resultatene fra TRT testen til å beregne varmeledningsevnen (Liebel, 2012).

Den effektive varmeledningsevnen funnet ved den termiske responstesten betegner både berggrunnens varmeledningsevne og bidrag fra mulige grunnvannsbevegelser. Det omhandler altså varmeoverføring både i form av varmeledning og ved

konveksjon. Den termiske borehullsmotstanden er en parameter for varmeoverføringen i borehullet. Parameteren indikerer også hvor god kollektoren er som effektiv borehullsvarmeveksler. Det er ideelt med en lav borehullsmotstand, siden dette betyr at varmeoverføringen er god og at temperaturforskjellen mellom kollektorvæsken og borehullet er lav (Ramstad, 2013a).

I et lukket system vil en termisk responstest gå ut på å sende oppvarmet væske i en kollektorslange ned i et borehull, se illustrasjon av oppsettet i figur 3.12 (Gehlin, 2002). Kollektorslangene i borehullet er koblet opp mot TRT maskinen (Liebel, 2012). En viktig faktor under denne prosedyren er ordentlig isolering av overgangen mellom kollektorslangene og TRT maskinen. Dersom det ikke er isolert godt nok vil det kunne medføre varmetap som vil kunne gi misvisende resultater. Det er også en mulighet for at dersom koblingen ikke er isolert nok, kan kollektorvæsken oppvarmes uønsket som følge av solstråling. En sirkulasjonspumpe blir brukt for å skape en turbulent strøm i kollektorslangene, for å sikre en best mulig transport av varme nedover i borehullet (Liebel, 2012). Deretter blir nøye temperaturmålinger tatt nedover i borehullet for å se temperaturendringene i grunnen. Det er temperaturendringen i grunnen etter at varme er tilført og utvunnet fra borehullet som avgjør den termiske responsen til borehullet. Varmeoverføringen til og fra borehullet vil da resultere i en temperaturendring i grunnen (Gehlin, 1998).



**Figur 3.12:** Illustrasjon av oppsettet ved gjennomføring av en termisk responstest av et borehull hentet fra Gehlin (2002).

### 3.5.1 Feilkilder som kan gi misvisende resultater

Det er flere feilkilder ved gjennomføring av en termisk responstest (Liebel, 2012). Mange av feilkildene er relatert til grunnvannsbevegelsene. Som tidligere nevnt vil uønsket varme tilføring eller tap som følge av utilstrekkelig isolasjon kunne gi misvisende resultater. En annen feilkilde oppstår dersom strømtilførselen til TRT maskinen varierer. Resultatene blir påvirket dersom den uforstyrrede temperaturen til grunnen ikke er korrekt og nøyaktig nok. En annen feilkilde er relatert til at vannet i borehullet har fri konveksjon. Feilkildene relatert til grunnvannsbevegelsene omhandler horisontal gradientstyrt grunnvannsbevegelse og vertikal tetthetsstyrt grunnvannsbevegelse (Liebel, 2012).

### 3.5.2 Matematiske modeller for analyse av resultatene

Resultatene fra en termisk responstest kan både analyseres av analytiske- og numeriske matematiske modeller. Den analytiske metoden omhandler blant annet linjekilde metoden og sylinderkilde metoden. Ved de analytiske metodene blir flere forenklete antagelser tatt, angående borehullets geometri og de varmeutvekslende rørene. De numeriske modellene kan gå mer i detalj, men vil ofte være mer tidkrevende og komplekse (Gehlin, 2002).

### 3.5.3 Distribuerte temperaturmålinger med fiberoptiske kabler

Distribuerte temperaturmålinger nedover i borehullet kan bli tatt med fiberoptiske kabler (Acuna, 2010). Fiberoptikk omhandler utsendelse av lyssignaler som overføres igjennom optiske fibre (Johnsen & Øverby, 2022). Prinsippet bak distribuerte temperaturmålinger baserer seg på ”Raman optiske tidsdomene reflektometri” (Acuna, 2010). Dette prinsippet baserer seg på å sende ut pulser med laserlys igjennom de optiske fiberkablene. Dette resulterer i at det reflekteres lys med en annen frekvens, og dette signalet registreres. Basert på analyse av denne informasjonen over en lengre periode kan temperaturen i borehullet avgjøres (Acuna, 2010).

Kvaliteten på lyssignalet som går igjennom fiberkabelen svekkes ved avstanden ned i borehullet. Lyssignalet vil være størst ved instrumentet som sender ut signalet. Det vil derfor være svakere signaler i den nederste delen av borehullet, noe som må tas hensyn til ved at disse signalene har en lengre integrasjonstid (Acuna, 2010). Dersom lyssignalet skal gå over en lengre lengde med optiske fibre, kan man underveis regenerere eller forsterke lyssignalet (Johnsen & Øverby, 2022). Optiske fiberkabler kan ha varierende diameter, og spesifikasjoner for kablene avhenger av produsenten (Acuna, 2010).

### 3.6 XRD

XRD står for "X-ray Diffraction Analysis" og er en analytisk metode benyttet for å finne krystallstrukturen til mineralene i en prøve (Malvern Panalytical, u.å.). Metoden kan også benyttes for å måle graden av forurensning i en prøve, identifisere leire og til å avgjøre dimensjonene i en enhetscelle (Dutrow & Clark, u.å.). Analysen karakteriserer materialer med en størrelse på nanoskala (Holder & Schaak, 2019). XRD-analysen gir både en kvantitativ og en kvalitativ analyse av mineralene i prøven. Denne metoden destruerer ikke prøvematerialet under testing. Det tar ikke lang tid å gjennomføre selve testen, det mest tidkrevende ved denne metoden er prepareringen (Malvern Panalytical, u.å.). Det tar vanligvis under 20 minutter å analysere en prøve ved XRD (Dutrow & Clark, u.å.).

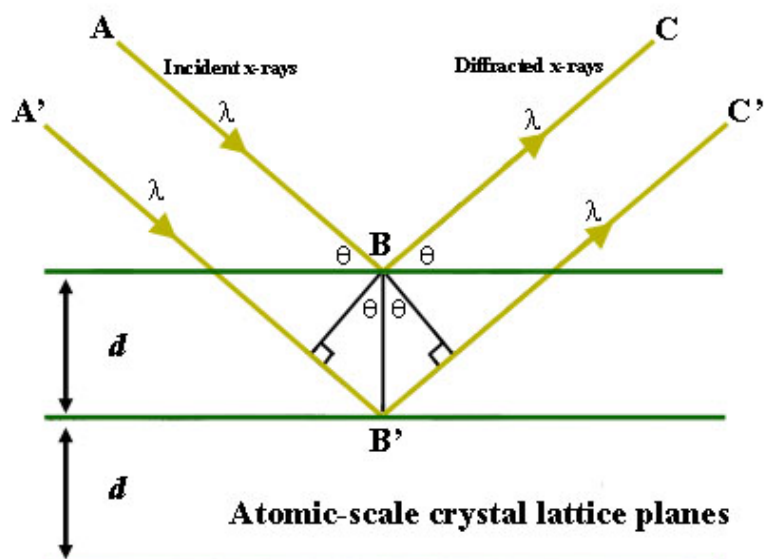
Prøven knuses ned til en kornstørrelse på 10 mikrometer og utsettes for røntgenstråling. Det er viktig å komme ned i denne størrelsen og at kornene avrundes for å få riktig resultat i XRD analysen. Ved nedknusning til et så fint pulver blir prøvematerialet mer homogent. Strålingen av prøven foregår over et spenn av ulike grader, den starter på en maksimums grad og går videre nedover (Dutrow & Clark, u.å.). Det dannes konstruktiv interferens mellom disse røntgenstrålene og prøvens krystallstruktur. Ved analysing av diffraksjonsmønsteret etter en gjennomført XRD-test kan Braggs lov benyttes, se formel 4 (Malvern Panalytical, u.å.). Det er viktig å merke seg her at diffraksjonsvinkelen må oppgis i radianer i formelen. Det er et standarsverk for d-verdier vanlige for ulike mineraler, som benyttes

ved karakteriseringen (Henry mfl., u.å.). I dag er det en rekke programmer som gjør analyseringen av resultatene enklere, slik som Diffrac.eva og Diffrac.TOPAS. Programmene gjør at det ikke er nødvendig å regne ut for hånd med blant annet Braggs lov.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (4)$$

- $n$  = heltall
- $\lambda$  = Bølgelengden til røntgenstrålene prøven utsettes for
- $d$  = avstanden mellom to plan i krystallstrukturen
- $\theta$  = diffraksjonsvinkelen

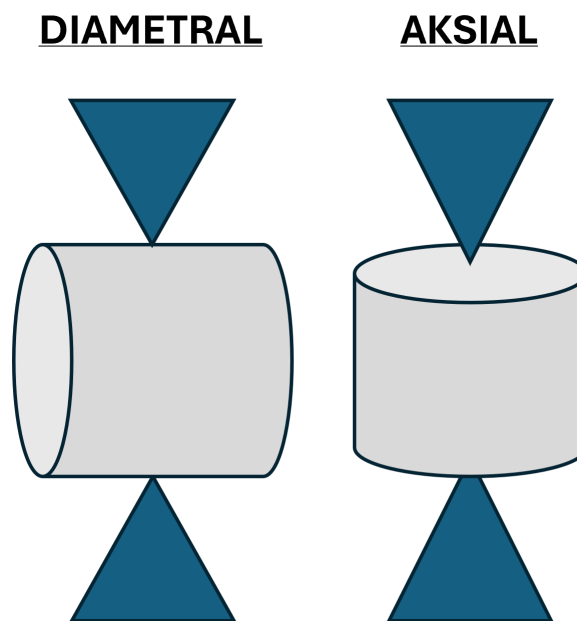
Braggs lov kan illustreres slik som gjort i figuren 3.13 (Henry mfl., u.å.). Her vises de inngående røntgenstrålene som sendes ut på prøven, og de diffrakterte bølger som sendes ut igjen. Disse diffrakterte bølgene registeres og identifiseringsen blir gjort på grunnlag av disse (Henry mfl., u.å.).



**Figur 3.13:** Illustrasjon av Braggs lov, der røntgenstrålene som prøvene utsettes for sendes ut som diffrakterte bølger hentet fra Henry mfl. (u.å.).

### 3.7 Punktlasttest

En punktlasttest vil kunne indikere styrken til et materiale, gitt ved et indekstall  $I_s$ . Dette indekstallet  $I_s$  er gitt i MPa. Testen kan gjennomføres både ute i felt og på laboratoriet, på både kuttete blokker, kjerneprøver og irregulære prøver (Franklin, 1985). Testutstyret er flyttbart. Ved testing på kjerneprøver blir to ulike punktlasttester gjennomført, en aksial og en diametral test. Se illustrasjon av de to testmetodene i figur 3.14. Prøven påføres en last  $P$  igjennom to kontaktpunkter, der avstanden mellom disse er distansen  $D$ . Lasten påføres til det går et brudd i prøven, og bruddlasten  $P$  registreres (Franklin, 1985). Lasten påføres manuelt med en hydraulisk jekk i en ønsket hastighet på 2 kN/sek. En høyere eller lavere hastighet enn dette vil kunne gi feilaktige resultater. For at en prøve skal registreres som godkjent, må bruddet gå igjennom de to kontaktpunktene der lasten påførtes prøven.



**Figur 3.14:** Illustrasjon av diametral- og aksial punktlasttest på kjerneprøver. Her vises hvor de to belastningspunktene (se de blå pilene) påføres på den kuttete kjernen (den grå sylinderen i midten). Illustrasjon laget av Celina Julia Engen.

### 3.8 Leapfrog

Leapfrog er et 3D modelleringsprogram eid av Seequent Ltd som ble lansert i 2004 (Ingeoexpert, u.å.). Innen geologisk 3D-modellering er Leapfrog det ledende programmet. Det blir benyttet innen gruvedrift, geotermisk energi og hydrogeologi (Seequent, u.å.-a). Programmet kan ta inn store datasett og raskt tolke dette inn i en 3D modell. Kart fra GIS kan også legges inn i modellen (Seequent, u.å.-b). Programmet tar inn både punkt- og intervall informasjon.



## 4 Områdebeskrivelse

### 4.1 Historien til Nyhavna

Nyhavna er idag et havneområde preget av industri, krigs- og kulturminner (Runden, 2020). Det ligger mange ulike bygg i området, som mekaniske verksteder og lagerbygninger (Rosvold, 2022). Området har ikke alltid vært slik det er idag, på 1870-tallet var området kjent som "Floridakysten", se figur 4.1. Dette navnet skyldes at området da hadde en hvit sandstand som var en populær badedestinasjon. Området hadde også store gressletter som ble brukt til ulike idretter (Nyhavna, u.å.).

Etableringen av industri på Nyhavna begynte på slutten av 1800-tallet. Sentrale industribygg er Jordan trankokeri, Nidaros teglverk, Aktiebryggeriet, dampvaskeri og Nielsens mekaniske verksted. Lagervirksomhet ble også startet i området på denne tiden. Deretter i 1904 kom et viktig knutepunkt for Østbyen, Lademoen stasjon. I 1906 ble Strandveien kai bygd, og på denne tiden er det dominerende bygget i området Aktiebryggeriet (Nyhavna, u.å.).



**Figur 4.1:** Bildet av Floridakysten på Nyhavna fra 1915 tatt av Ingebrigt Lunde (Nyhavna, u.å.).

Senere begynte det å tømmes søppel og kloakk i området. Nidar sjokoladefabrikk i Ulstadløkkveien tømte og gravde ned brekkasje i strandområdet på Nyhavna. Denne brekkasjen ble raskt oppgravd av barn i området. Kombinasjonen av søppel, innhold fra utedoer og oppgravning av brekkasje var ikke heldig. Likevel forble området populært både som bade- og oppholdsplass frem til 1941 da utbygning i Strandveien ble startet av tyskerne. I 1918 sluttet kloakk å tømmes i vannkanten, men dumping av søppel foregikk helt frem til 1960-tallet (Nyhavna, u.å.).

I 1912 ble planen for utbyggingen av Nyhavna vedtatt, men utbyggingen ble preget av forsinkelser grunnet dårlige tider og begrensede midler. I løpet av 1920-tallet blir først en flytedokk fra England etablert for å reparasjon av større skip. Deretter blir moderne jernbanespor lagt med hensikt om å importere kull og koks (Nyhavna, u.å.).

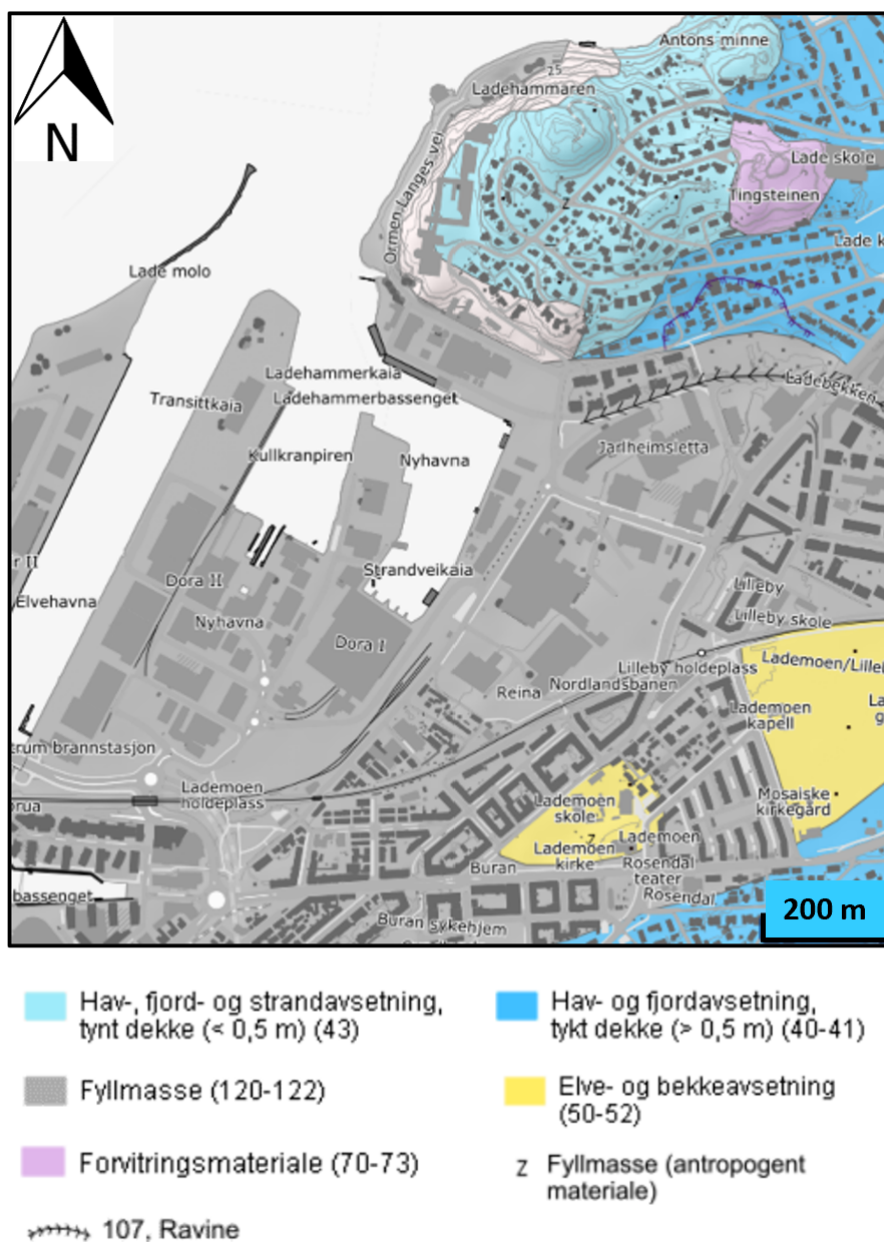
På Nyhavna finner man også to tilfluktstårn som ble laget under andre verdenskrig, se figur 4.2. Disse tårnene fungerte som et raskt tilfluktsted ved bombing og rommer rundt 270 mennesker hver (Nyhavna, u.å.).



**Figur 4.2:** Bilde av tilfluktstårnet på Nyhavna. Bildet er tatt av Celina Julia Engen den 24.oktober.2024.

## 4.2 Løsmassene på Nyhavna

Kvartærgeologisk løsmassekart hentet fra Norges geologiske undersøkelse (u.å.-c) viser at området der testboringen er gjennomført består av antropogene løsmasser, se figur 4.3. Ovenfor Ladehammeren ligger det hav- og fjord avsetninger. Disse marine avsetningene befinner seg under de antropogene fyllmassene som har kommet i nyere tid på Nyhavna. Elve- og bekkeavsetninger er også å finne i området som figur 4.3 viser. Dette laget vil ligge under de antropogene massene og over de marine avsetningene.



Figur 4.3: Løsmassekart over Nyhavna (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-c).

I forhold til løsmassedekket mektighet gir kartet begrenset informasjon, kun tilfeller der det angis tynt eller tykt. Informasjon i dybden om løsmassenes lagfordeling er ikke tilgjengelig, kun det øverstliggende laget.

Multiconsult har gjennomført 18 totalsonderboringer på Nyhavna for å se lagdelingen i grunnen (Romstad, 2024). Disse totalsonderboringene er modellert inn i en 3D modell i Leapfrog (se delkapittel 6.8). Modellen viser de ulike løsmasselagene i de 18 totalsonderboringene og dybden til fjell. Det er funnet både fyllmasser, elve- og bekkeavsetninger og marine avsetninger ved totalsonderboringene.

### 4.3 Berggrunnen på Nyhavna

Berggrunnskart hentet fra Norges geologiske undersøkelse (u.å.-a) viser at berggrunnen i området består av grønnstein, se figur 4.4. Det er også et mindre parti høyere oppe i terrenget ved Ladehammeren som har registrert en intermediaær vulkansk bergart, blant annet kvartskeratorfyrt. Helningen og orienteringen til denne gangen vil være med på å avgjøre om den kan bli truffet av borehullene.

Viktig å merke seg at disse berggrunnskartene har en maksimum skala på lokalt nivå 1:50 000, som vil si at berggrunnen ikke er detaljkartlagt. Bergartsgrenser vil derfor ikke nødvendigvis være satt helt korrekt i forhold til forholdene ute i felt.

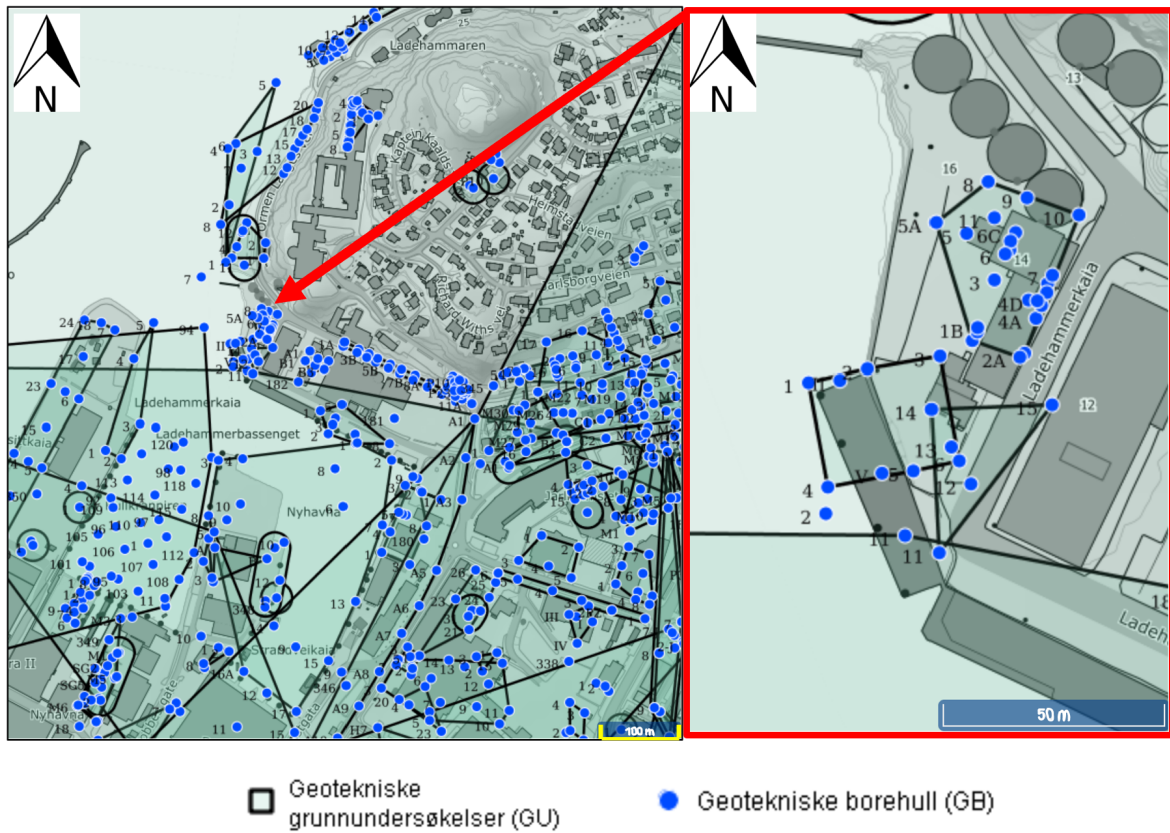


**Figur 4.4:** Berggrunnskart over Nyhavna (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-a).

#### 4.4 Tidligere grunnundersøkelser på Nyhavna

Det har blitt gjort en rekke geotekniske grunnundersøkelser og grunnboringer på Nyhavna. Norges geologiske undersøkelse (u.å.-d) har kart over de ulike grunnundersøkelsene, se figur 4.5. Grunnboringene i området der testbrønn 3 ble boret har blitt gjennomført av Rambøll. Rambøll i samarbeid med Trondheim kommune ga ut en rapport i 2009 over grunnforholdene i området (Gilde, 2009). Rapporten konstaterer at ved Ladehammerkaia består de originale massene av marin leire. Fyllmassene i området blir også vurdert med en mektighet på rundt

3-5 meter. Dybden til fjell er generelt stor i området, og er over 100 meter flere steder på Nyhavna (Gilde, 2009). Berg- og løsmassegrensen ble modellert inn i 3D-modellen i Leapfrog, se mer under delkapittel 6.8.

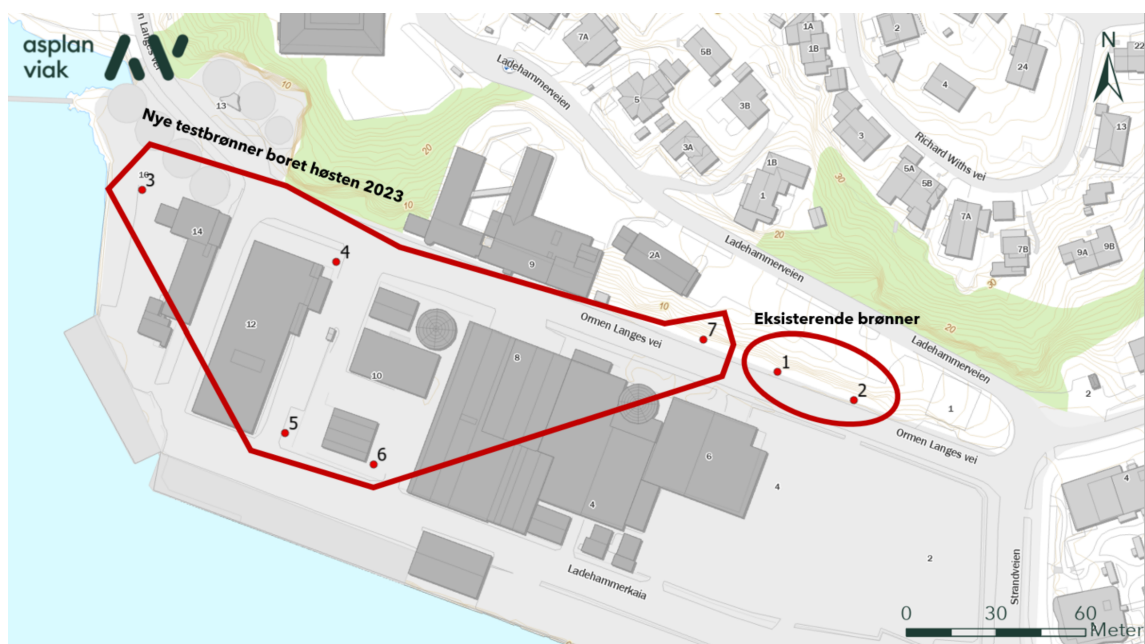


**Figur 4.5:** Kart over grunnundersøkelsene gjennomført på Nyhavna (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-d). Spesielt fokus på området der boringen av testbrønn 3 ble gjennomført.

## 5 Metode

### 5.1 Boring av testbrønn på Nyhavna

Totalt på Nyhavna har det blitt boret syv testbrønner, de to første testbrønnene ble boret i 2020. De resterende fem i 2023. Alle boringene har blitt gjennomført av entreprenøren Båsum boring hvor Asplan Viak var konsulent. Se kart med lokasjonen til borehullene på Nyhavna i figur 5.1.



**Figur 5.1:** Kart over Nyhavna med de totalt syv testbrønnene boret, produsert av Asplan Viak.

Boringen av testbrønn 3 startet den 24.oktober på Nyhavna i Trondheim. Under boringen ble kaksprøver for hver niende meter tatt, altså for hver tredje borstang. Dette var for å få et representativt antall kaksprøver nedover i borehullet. Kaksprøvene består av berggrunn mekanisk oppknust av borekrona. Borerne fra Båsum boring var veldig behjelpelige ved prøvetakningen og svarte på alle mulige spørsmål. Bilde av utstyret benyttet for boringen kan ses i figur 5.2 og 5.4. Som bildene viser, var vi veldig heldige med været under boringen.



**Figur 5.2:** Bilde av boreutstryret benyttet under boringen av testbrønnen. Båsum Boring var entreprenøren som gjennomførte boringen og sto for utstyret. A) borutstyr fra siden B) borutstyr forfra.

En borstang har en lengde på 3 meter, det ble altså påkoblet en ny borstang for hver tredje meter boret. Testbrønn 3 var tenkt å ha en dybde på 250 meter, men boringen ble avsluttet ved rundt 216 meter. Denne tidligere avslutningen skyldtes store mengder vann. Flere testbrønner skulle bores på Nyhavna de kommende dagene, og det var ikke hensiktsmessig å bruke mer tid på å bore brønnen dypere når 216 meter var tilstrekkelig. Denne avgjørelsen ble tatt av Randi Kalskin Ramstad og Henrik Holmberg fra Asplan Viak sammen med borerne fra Båsum Boring.

Løsmassedekket var på syv meter og det ble sveiset sammen tre foringsrør med en lengde på tre meter hver. Når et nytt foringsrør ble påkoblet måtte det sveises fast, noe som gjorde at det tok en del lengre tid å sette ned disse rørene sammenlignet med borstengene. Sveisingen ble gjort for å hindre lekkasjer inn i røret. Løsmassene boret igjennom kom ut på grunnen rundt boremaskinen. Basert på utseende og konsistensen til massene er det antatt å være marine avsetninger. Se bilde av massene ved boreplassen ved C i figur 5.5. Etter siste foringsrør var boret ned ble bentonitt helt ned i borehullet, igjen for å hindre vanninntrengning.

Som tidligere nevnt var det utfordringer med store mengder vann under boringen. I løpet av dag 1 av boringen ble en hel kontainer fylt med vann, og boringen



måtte stoppes ved en dybde på 90 meter ned i berggrunnen. To nye containere ble bestilt for å holde på vannet som kom opp fra borehullet, disse sto klare dagen etter (25.okt). Det var ikke mulig å sende dette vannet ut i fjorden siden det kunne lede til forurensning.

## 5.2 Kaksprøver samlet inn under boringen av testbrønnen

Under boringen ble det som sagt samlet inn kaks for hver tredje borstang. Dette resulterte i 25 innsamlede kaksprøver, se figur 5.3. Prøveposene var i størrelsesorden 15 cm x 21 cm. Det ble hentet inn en tilstrekkelig mengde for å kunne benyttes til XRD-analyse.



**Figur 5.3:** Bilde av de 25 kaksprøvene hentet inn under boringen av testbrønn 3 på Nyhavna. Størrelsen på posene er 15 cm x 21 cm.

Første kaksprøve ble forsøkt tatt med spade under røret der kaksen kom ut i containeren. Dette fungerte dårlig grunnet mye vann og trykk, dermed ble prøvene heller tatt ved å holde en bøtte rett under røret. Forskjellen i mengden kaks i forhold til mengden vann i bøtten var stor, derfor ble mye av vannet helt ut fra bøtten. Dette ble gjort for å kunne samle inn kakset som samlet seg i bunnen av

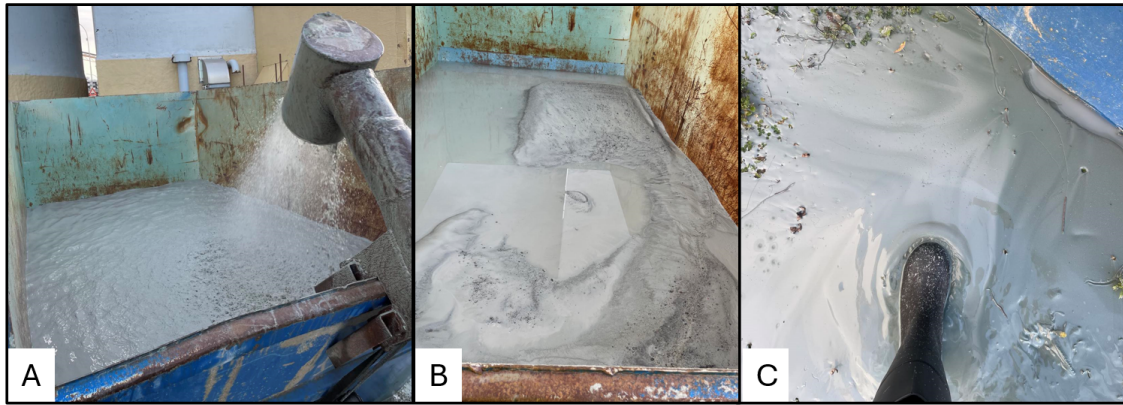
bøtten. Utstyret ble vasket mellom hver prøvetakning med vann og klut. Dette ble gjort for å sikre at kaks fra ulike dybder ikke ble blandet sammen. Figur 5.4 viser bilde av kontaineren og påkoblingen av røret som førte kaks og vann til kontaineren.



**Figur 5.4:** Bilde tatt under boringen av A) Kontainer med presenning dekkende over, her ble kaks og vann samlet opp under boringen. B) Manuell påkobling av røret som førte kaks og vann inn i kontaineren, dette ble gjort etter at løsmassene var boret igjennom.

Tanken var å registrere kakset sitt utseende kontinuerlig imens det ble boret, men som bilde A ved figur 5.4 viser så var dette ikke mulig. Grunnet presenning rundt kontaineren var det ikke mulig å se kakset som kom ut imens det ble boret. Presenningen hadde et lite hull ved røret der man tok inn bøtten for å samle kaksen. Grunnet trykksatt luft og vann benyttet under boringen, kunne dette bli utfordrende ved at mye støvholdig luft trakk ut fra hullet. Presenningen ble fjernet dag 2 av boringen.

Det ideelle hadde vært at kakset kom ut uten vann, det hadde gjort det mulig å observere kaksets karakter kontinuerlig under boring når presenningen var fjernet. Den vannfylte kontaineren gjorde det umulig å se hvordan det utgående kakset så ut. Dette fører til at det er kaksprøvene hentet inn som legger grunnlaget for identifiseringen av berggrunnen i borehullet. Vann og kaks som går ut i kontaineren under boring, massene i kontaineren og massene som samlet seg opp under boringen i løsmassene kan ses i figur 5.5.



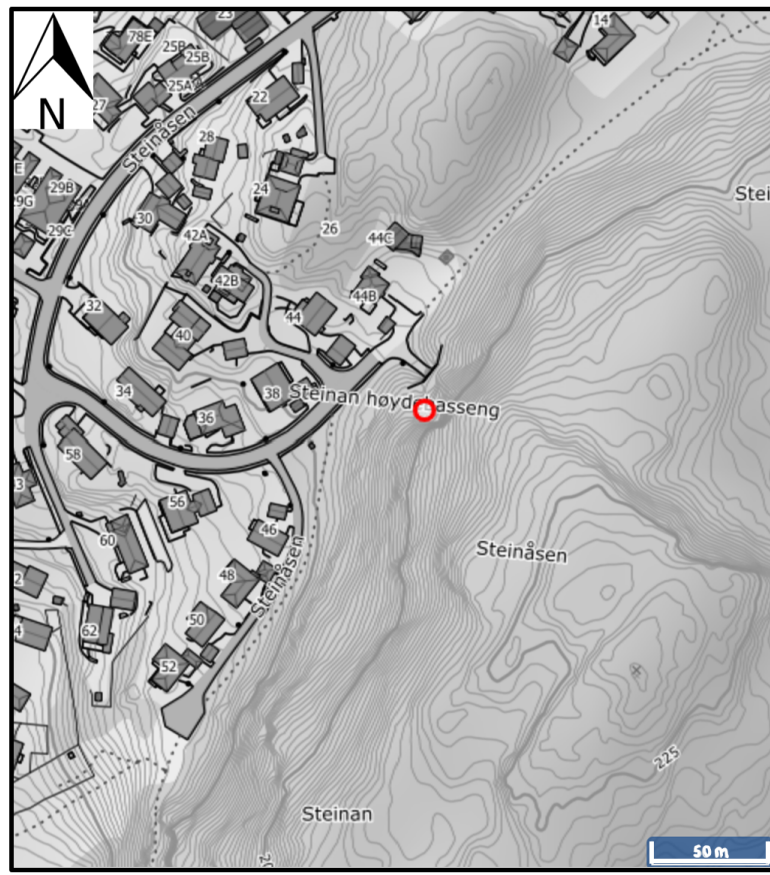
**Figur 5.5:** Bilder som er tatt under boringen. A) Vann og kaks som kommer ut fra røret i et høyt trykk grunnet at trykksatt vann benyttes under boringen. B) Kaks som ansamles i kontaineren under boringen. Dette i tillegg til en stor mengde vann gjør at flere containere var nødvendige. C) Massene på bakken etter boring igjennom løsmassene med foringsrør, da røret ikke var påkoblet. Støvel i størrelse 39 som skala.

Det var et tilfelle der det ble samlet inn to kaksprøver fra samme boredyp, og det var ved borstang 33. Altså 99 meter ned i berggrunnen. Her var det et tydelig skifte til mere felsiske mineraler i kakset og det var tydelig lysere enn prøvene tidligere samlet inn. Derfor ble det tatt to prøver i tilfelle dette kun var et tynn gang i berggrunnen, for å få tilstrekkelig med prøvemateriale.

Alle kaksprøvene samlet inn ved testboringen ble observert og beskrevet på grunnlag av blant annet farge, kornform og glans. Oversikt over beskrivelse av kaksprøvene og nummerering basert på borestenger ses i vedlegg under tabell B.1. Kaksprøvene sin grovhet var avhengig av hvor på borestanga man tok prøven og hvordan man holdt bøtta. Det som er omtalt som glimmer i finstoffet er bare en antagelse tatt ved den visuelle observasjonen av kaksprøvene, og refererer da til gjenskinn/glans i prøven. Dette ble spesielt observert i finstoffet til prøvene. Her vil XRD-analysen avdekke om prøvene faktisk inneholder glimmer.

### 5.3 Innhenting av grønnstein for kjerneboring

Prøvestykket som skulle benyttes til å bore ut sylindriske prøver for senere oppvarming og avkjøling, ble hentet rett utenfor inngangen til Steinan høydebasseng (se figur 5.6).



**Figur 5.6:** Kart over Steinan der grønnsteinen ble hentet ved det røde punktet (Norges geologiske undersøkelse, u.å.-a).

Det ble hentet inn to prøver som deretter ble fraktet med bil til berglaboratoriet på PTS, se prøvene ved B i figur 5.7. Ved utplukking av grønnsteinen var det ønskelig med en så lite forvitret eksemplar som mulig, i tillegg til en minimumstørrelse på 30 x 30 cm. Eksemplaret skulle også være så uniformt som mulig, for å unngå store usikkerheter relatert til anisotropi. Ved hjelp av veileder Bjørn Frengstad sin styrke, planke og reimer ble steinen trygt plassert inn i bil (se A ved figur 5.7). Det var altså ikke nødvendig med slegge og hammer, da vi fant et bra eksemplar løst ved blotningen. Rett ved der grønnsteinen ble hentet var det synlige tegn etter boring i berget.

### 5.3.1 Kjerneboring av grønnsteinen

Boring av grønnsteinen med radialbormaskin resulterte i 56 kjerner med en diameter på 40 mm. Se C ved figur 5.7 for bilde av bormaskinen. Disse kjernene ble delt inn

i to, da 28 kjerner som skulle utsettes for oppvarming og 28 kjerner som ikke skulle det. Prøvene av grønnsteinen hadde foliasjon som var tatt hensyn til ved boringen av kjerneprøvene. Det ble forsøkt å bore vinkelrett på denne foliasjonen.



**Figur 5.7:** A) Bilde av veileder Bjørn Fregstad som plasserer grønnsteinen inn i bilen for trygg transport til PTS B) Bilde av de to grønnstein hentet på Steinan for å bore kjerneprøver, C) Radialbormaskinen på PTS benyttet for kjerneboring av grønnsteinen.

Bilde av kjerneprøvene kan ses ved figur 5.8 og 5.9. Lengden på disse kjerneprøvene varierte fra minimum 26 mm opp til 165 mm. Prøvene ble inndelt i tre kategorier, ”God”, ”Ok” og ”Dårlig”. Denne inndelingen baserte seg da på hvordan kvaliteten til kjerneprøvene så ut til å være. Hovedkriteriet var antydningen til sprekkeplan langs kjernen, desto flere desto dårligere rangering.

Denne inndelingen ble gjort for å sikre at prøve kvaliteten mellom de to inndelingene (oppvarmet, ikke oppvarmet) var relativt lik. Altså ble like mange gode, ok og dårlige kjerner fordelt på de to testgruppene (oppvarmet, ikke oppvarmet). Dermed ble det ikke et større antall dårlige prøver i en av gruppene, som kunne resultert i et misvisende resultat. Hvis det ses en trend i at de dårligere kategoriserte prøvene er svakere, vil inndelingen kunne være med på å forklare dette.

Tettheten ( $\rho$ ) til et utvalg kjerneprøver ble regnet ut basert på målinger tatt med en digital skyvelære. Dette ble gjort for å få en representativ tetthet til prøvene. Ved formel 5 ble massen  $m$  (g), radiusen  $r$  (mm) og lengden  $L$  (mm) til de enkelte kjernene benyttet for å beregne tettheten (Heckman, 2024). Dette ble gjennomført før kjernene ble utsatt for oppvarming.

$$\rho = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot L} \times 1000 \quad [Kg/m^3] \quad (5)$$

## 5.4 Kjerneprøver utsatt for sykliske temperaturendringer

Halvparten av kjerneprøvene ble utsatt for sykliske temperaturendringer, se figur 5.8. Oppvarmingen av prøvene foregikk fra 03.11.23 - 19.01.2024, noe som resulterte i 43 oppvarming- og avkjølningscykluser.

Sylinderprøvene ble varmet opp i et varmeskap på det bergmekaniske laboratoriet til NTNU. Temperaturen var kontinuerlig 105 °C. Oppvarmingsperioden den første måneden var på 8 timer (fra 08:00-16:00), deretter gikk den ned til 7 timer (fra 09:00-16:00). Tiden ble satt for å sikre at hele prøven ble varmet opp til 105 °C. De 28 kjerneprøvene ble plassert i to metall former for å hindre at de måtte ligge oppå hverandre.

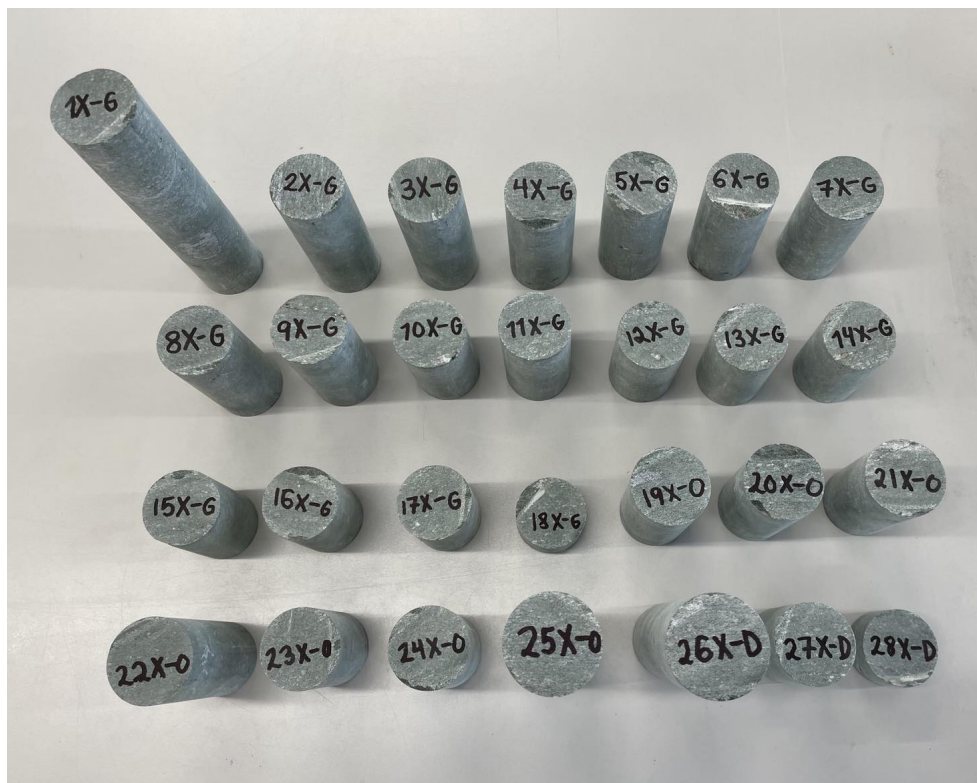


**Figur 5.8:** Bilde av de 28 sylinderprøvene som ble varmet opp. Kjernene ble nummerert, der V står for "oppvarming", G står for "god", O står for "ok" og D står for "dårlig". Dette var de tre inndelingene som ble satt som representerer kjernens kvalitet.

Avkjølingstiden første måned på 16 timer (fra 16:00-08:00) og deretter på 17 timer (fra 16:00-09:00). Det var viktig at både oppvarmingstiden og avkjølingstiden var tilstrekkelig, slik at prøvene faktisk gjennomgikk en temperatursvingning fra romtemperatur opp til 105 grader en gang i døgnet.

## 5.5 Kontrollgruppe uten sykliske temperaturendringer

Andre halvdel bestående av 28 kjerneprøver fra samme grønnstein ble ikke utsatt for sykliske temperaturendringer, se figur 5.9. Disse kjerneprøvene fungerte som en kontrollgruppe for å kunne sammenligne resultatene fra punktlasttestene av oppvarmede og ikke-oppvarmede prøver.



**Figur 5.9:** Bilde av de 28 sylinderrøvene som ikke ble varmet opp. Kjernene ble nummerert, der X symboliserer at de ikke har blitt varmet opp, G står for "god", O står for "ok" og D står for "dårlig". Dette var de tre inndelingene som ble satt som representanter kjernens kvalitet.

De ikke-varmede kjerneprøvene ble ikke plassert inn i et varmeskap 43 ganger slik som de oppvarmede prøvene. Mulige slag og støt mellom kjernematerialet under disse forflytningene kunne forstyrre prøvene ytterligere, siden prøvene var plassert i

metallformer der kjernene lett bevegde seg. De ikke-oppvarmede prøvene ble derfor flyttet frem og tilbake mellom to benker 43 ganger i samme metallformer. Dette ble gjennomført for å utelukke eventuelle forskjeller som følge av disse forstyrrelsene.

## 5.6 Punktlasttest av kjerneprøver

Det ble gjennomført punktlasttest på de oppvarmede og de ikke oppvarmede kjernene på det bergmekaniske laboratoriet til NTNU. Testutstyret benyttet for å gjennomføre punktlasttestene kan ses i figur 5.10.



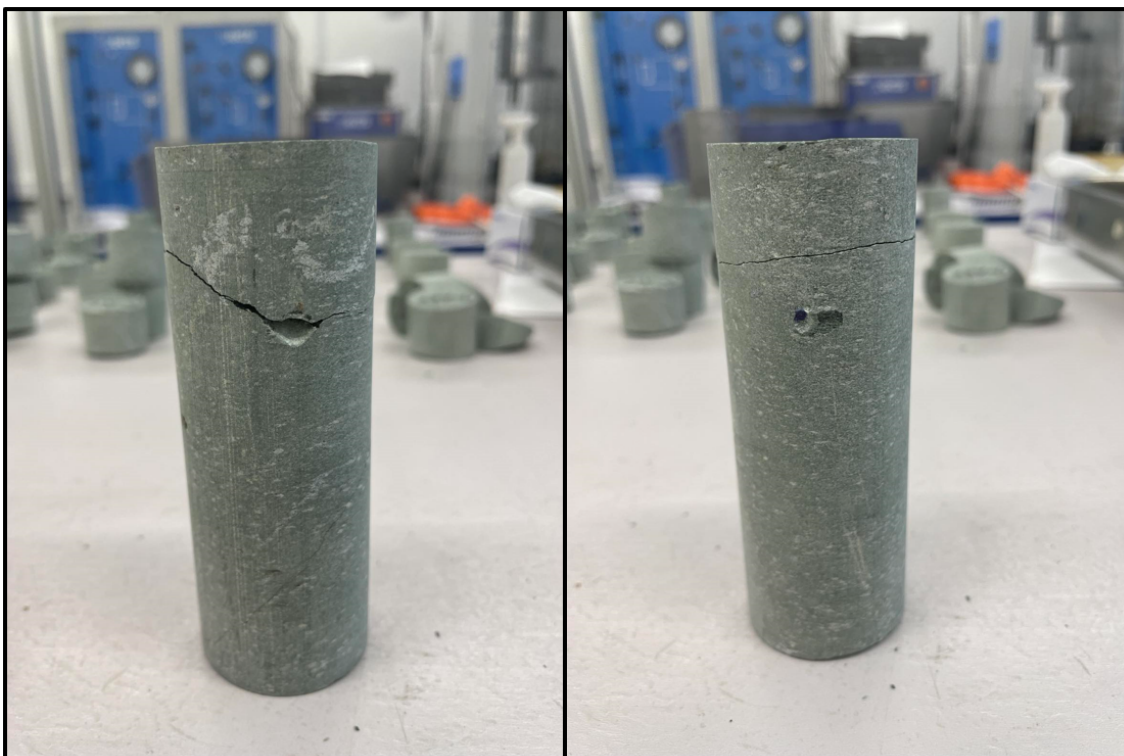
**Figur 5.10:** Testutstyret benyttet for å gjennomføre punktlasttestene.

Det var viktig at de oppvarmede kjerneprøvene var ordentlig avkjølt til romtemperatur før teststart, derfor hadde de stått til avkjøling over helgen. Både diametral og aksial test ble gjennomført, som resulterte i to indeksverdier



$I_s(50)$ , *diametral* og  $I_s(50)$ , *aksial*.

Ved gjennomføringen ble kjerneprøvene satt inn i apparatet så vannrett og midt på som mulig. Prøvestykkene måtte belastes minst  $0.5 \cdot$  diameteren inn på prøvestykket ved den diametrale testen, for å hindre spenningsanisotropi i prøvestykkets ende i å påvirke resultatene. Kjernene ble belastet manuelt med en hydraulisk jekk, der den mest optimale hastigheten var  $0,2 \text{ kN}$  i sekundet. For at en prøve skulle godkjennes måtte bruddet gå igjennom de to kontaktpunktene der belastningen ble påført. Et eksempel på en ikke-godkjent prøve kan ses i figur 5.11.



**Figur 5.11:** Bildet viser et eksempel på en ikke-godkjent prøve ved en diametral punktlasttest. Det markerte blå punktet er kontaktpunktet der bruddet skulle gått igjennom.

Den aksielle testen var mer utfordrende å gjennomføre enn den diametrale, grunnet at lengden til prøvestykket ikke kunne overskride det dobbelte av diameteren. Prøvestykker som var for lange ble kappet til med en diamantsag (se figur 5.12). Den minste lengden prøvestykkene kunne ha ved den aksielle testen var diameteren  $\cdot 0.3$ . Før den aksielle testen ble gjennomført på de kuttete prøvene var det viktig at de tørket fullstendig.



**Figur 5.12:** Diamantsag benyttet for å kutte til kjerneprøvene for å få egnet lengde til gjennomføring av aksial punktlasttest.

Totalt 19 prøver måtte kappes til med diamantsag for å benyttes til aksial punktlasttest, se figur 5.13.



**Figur 5.13:** Prøver som skulle kuttet for å kunne gjennomføre aksial punktlasttest. A) De tidligere oppvarmede kjernene som skulle kuttet B) De ikke-oppvarmede kjernene som skulle kuttet. Totalt 19 prøver.

Punktlastindeksen  $I_s$  ble beregnet ved formel 6 der den ekvivalente distansen  $D_e$  og bruddlasten  $P$  inngikk. Det er viktig å merke seg at her står  $D$  parameteren for distanse og ikke diameter. Diameteren til prøven blir gitt ved parameteren  $W$ . Under den diametrale punktlasttesten vil distansen  $W$  og diameteren  $D$  være lik. Ved den aksiale testen må diameteren og distansen benyttes for å komme frem til  $D_e$  ved formel 7 (Statens Vegvesen, 2021).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad [MPa] \quad (6)$$

$$D_e^2 = \frac{W * D * 4}{\pi} \quad [MPa] \quad (7)$$

Med grunnlag i distansen  $D_e$  vil størrelseskorreksjons-faktoren  $F$  bli utregnet ved formel 8. Deretter blir en korrigert punktlaststyrkeindeks  $I_s(50)$  regnet ut ved å benytte korreksjonsfaktoren  $F$  og punktlaststyrkeindeksen  $I_s$ . Utregningen av  $I_s(50)$  blir gjort ved formelen 9. Indeksen  $I_s(50)$  vil korrigere for ulik diameter og gjøre resultatene mer sammenlignbare (Statens Vegvesen, 2021).

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (8)$$

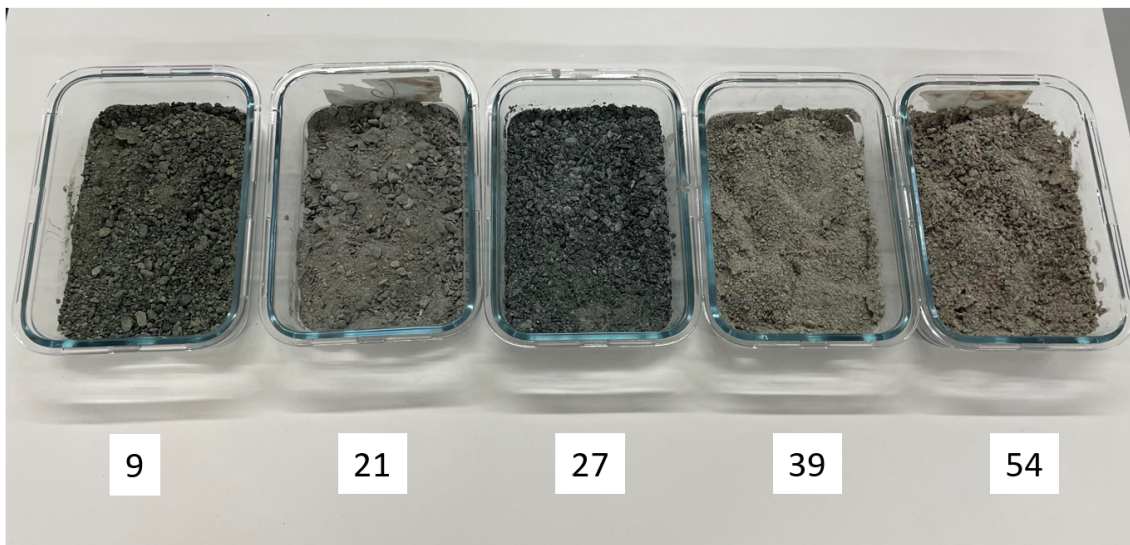
$$I_{s(50)} = F * I_s \quad [MPa] \quad (9)$$

En parameter som indikerer forskjellen i styrke parallelt og normalt på foliasjonen blir til slutt beregnet. Denne parameteren er styrkeanisotropiindeksen  $I_a$ , der  $I_s(50)$ , *diametral* og  $I_s(50)$ , *aksial* deles på hverandre i formel 10 (Statens Vegvesen, 2021).

$$I_a = \frac{I_{s(50),diametral}}{I_{s(50),aksial}} \quad [-] \quad (10)$$

## 5.7 XRD av kaksprøver

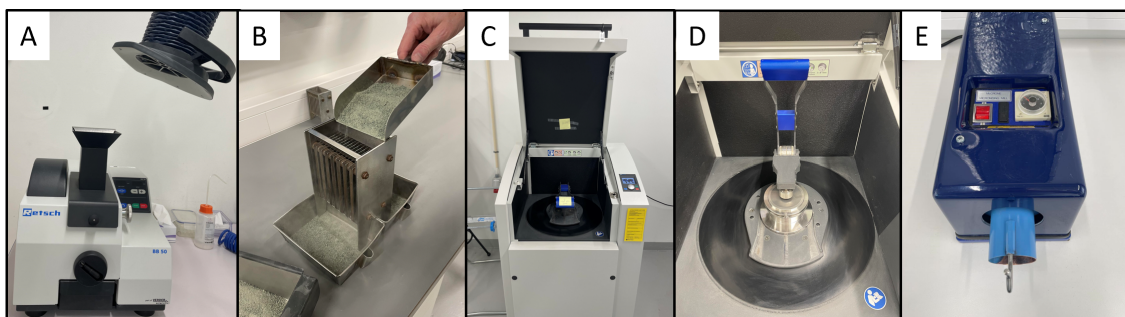
For XRD analyse på laboratoriet ble fem av kaksprøvene plukket ut, se figur 5.14. Hensikten var først og fremst å få mest mulig representative prøver av det som var mest av i borehullet. Utvelgelsen ble tatt på grunnlag av utseende til prøvene, da spesielt farge, glans og kornform. I tillegg var det ønskelig å få med kaksprøver som skilte seg ut, for å også få frem diversiteten i berggrunnen. Kaksprøvene ble det inn i tre grupper som representerte hovedtrendene i utseende, denne inndelingen var sentral ved utvelgelsen.



**Figur 5.14:** Kaksprøvene valgt ut til XRD analyse tørket klare for nedknusing og splitting. Nummereringen under prøven står for kaksprøvens nummer og må ganges med 3 meter for å få prøvedyp (dette vil være gjennomboret berggrunn, 7 meter løsmasser må legges til for faktisk dybde).

### 5.7.1 Preparering av prøver til XRD-analyse

Preparering av kaksprøvene nr. 9, 21, 27, 39 og 54 ble gjennomført 27.november.2023. Før preparering ble prøveposene med kaks fra borehullet overført til glasskåler og tørket i tørkeskap på 60 grader. Prøvene fra borehullet hadde mye vann, så de sto over en uke i varmeskap for å sikre at alt vannet hadde fordampet. Se det ulike utstyret benyttet for nedknusing og splitting i figur 5.15.



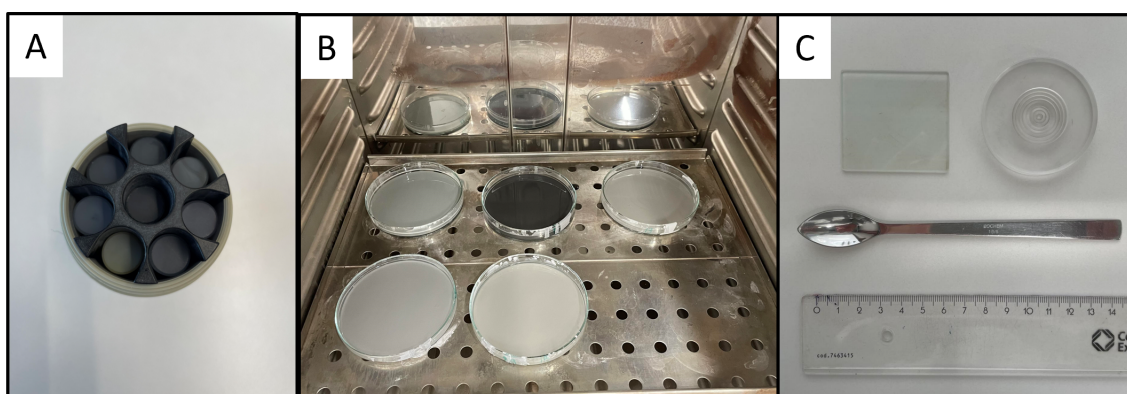
**Figur 5.15:** Testutstyret benyttet for preparering av kaksprøvene til XRD-analyse. A) Kjefteknuser B) Splitter C) Svingskivemølle D) Prøven plassert inn i svingskivemøllen E) Mikroniserende mølle

Først måtte kaksprøvene knuses opp videre i en kjefteknuser, se A ved figur 5.15. For ønsket prøvemengde til videre oppknusning ble prøvene splittet. For å få en representativ prøve ble en splitter benyttet, se B i figur 5.15. Splitteren fordeler massen jevnt i to beholdere. Ønsket var å splitte prøven frem til en masse på rundt 30 gram. Mellom hver kaksprøve ble kjefteknuseren og splitteren blåst ren med støvsuger, trykkluft og deretter vasket med alkohol.

Deretter ble de oppknuste prøvene kjørt igjennom en svingskivemølle med beholder av wolframKarbid, se C og D ved figur 5.15. Her varierte kjøretiden fra 1.5 minutt til 30 sekunder, avhengig av prøvens grovhet. Prøvene ble knust ned til mellom 50 og 30 mikrometer. Prøvekammeret av wolframKarbid ble vasket først med vann og deretter alkohol.

Videre ble en mikroniserende mølle benyttet for å avrunde kornene og få en størrelse på 10 mikrometer. Bilde av den mikroniserende møllen kan ses ved E i figur 5.15. Størrelsesreduksjonen og avrundingen av kornene i den mikroniserende møllen skyldes hovedsaklig friksjon (Retsch, u.å.). Denne prosessen startet med et malekammer med agatkuler (se A i figur 5.16), der en teskje pulver gjennomkjørt i svingskivemøllen ble tilsatt sammen med 10 mL etanol. Kjøretiden her var på 2 minutter. Deretter ble den gjennomkjørte prøven overført til en petriskål. Her kunne det være utfordrende å få den oppknuste finmassen over i skålen, grunnet alle agatkulene. Malekammeret, agatkulene og teskjeen ble vasket med vann og deretter alkohol mellom hver kaksprøve.

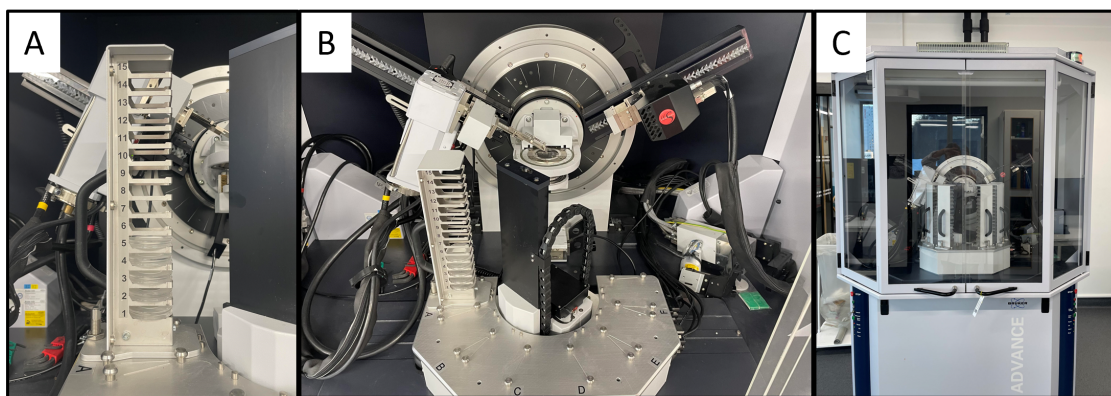
Når de fem prøvene var oppknuet og overført til petriskålene ble de satt i en varmeovn på 60 grader over natten, se B figur 5.16. Dette var for at alkoholen skulle fordampe. Neste dag ble prøvene skrapet ut av petriskålene ved benyttelse av en glassplate (se C i figur 5.16). Dette fine pulveret ble deretter overført til prøveholderen til XRD-analysen. En jevn overflate på prøveholderen ble laget ved hjelp av samme glassplate. En ny og ren glassplate ble benyttet mellom hver prøve, for å hindre kontaminering mellom prøvene.



**Figur 5.16:** Testutstyr og prøver for preparering for XRD-analyse. A) Malekammer med agatkuler (tilhørende den mikroniserende møllen) B) Petriskål med materialet oppknuet fra mikroniserende mølle til tørking C) Glassplate og teskje benyttet ved overføring av materialet i petriskålene til prøveholderen for XRD-analysen. Linjal som skala.

### 5.7.2 XRD-analyse

Selve maskinen benyttet for gjennomføringen av XRD-analysen kan ses i figur 5.17. XRD-analysen tok rundt 20 minutter per preparerte prøve. Resultatene fra XRD-analysen ble analysert dagen etter testen begynte. Analyseringen av resultatene ble gjort ved hjelp av programmene Diffraction.eva og Diffraction.TOPAS. Her ble de ulike mineralene i prøven identifisert og kvantifisert. Diffraction.eva sto for den kvalitative analysen der de ulike mineralene i prøven ble identifisert. Diffraction.TOPAS ble benyttet for den kvantitative analysen, der prosentandelen av de ulike mineralene ble funnet.



**Figur 5.17:** XRD-analyse maskinen. A) De 5 preparerte prøvene i XRD magasinet B) og C) XRD-maskinen

## 5.8 Teoretisk utledet varmeledningsevne fra XRD-resultatene

Basert på kvantiteten av de ulike mineralene gitt fra XRD-analysen av kaksprøvene ble den teoretiske varmeledningsevnen regnet ut. Formelen benyttet for utregning av teoretisk varmeledningsevne kan ses ved formel 11, modifisert fra masteroppgaven Strålberg og Hartvigsen (2022). Eksempel på utregning av den teoretiske varmeledningsevnen kan ses under vedlegg E.1.

$$\lambda_{\text{teoretisk}} = \frac{(\text{vekt}\%_{\text{kvarts}} \cdot \lambda_{\text{kvarts}}) + (\text{vekt}\%_{\text{epidot}} \cdot \lambda_{\text{epidot}}) + \dots}{100} \quad [W/m * K] \quad (11)$$

Her ble altså kvantiteten av de ulike mineralene fra XRD-analysen benyttet, og gjennomsnittsverdien av varmeledningsevnen til ulike mineraler i tabell 3. Verdiene i denne tabellen er basert på Clauser og Huenges (1995).

## 5.9 3D-modell i Leapfrog Geo

Programmet Leapfrog Geo ble benyttet for å lage en 3D-modell av testbrønnene og grunnforholdene på Nyhavna. Modellen ble hovedsaklig produsert ved å plote inn borehullsdata i Excel. Testbrønnene hadde en borehullsID og nøyaktige koordinater gitt fra Asplan Viak. BorehullsID-ene til de ulike testbrønnene kan ses i tabell 6.

Testbrønn	BorehullsID
1	EB1
2	EB2
3	EB3
4	EB4
5	EB5
6	EB6
7	EB7

**Tabell 6:** Tabell over testbrønnene og tilhørende borehullsID benyttet i Leapfrog.

18 totalsonderboringer gjennomført av Multiconsult ble også lagt inn i modellen. De hadde ikke en borehullsID, men ble gitt navn etter nummerering og type grunnundersøkelse. Derfor ble disse totalsonderboringene navngitt "TOT1", "TOT3", "TOT4" osv.

Navngivningen av de ulike fanene i Excel ble satt til "Collar", "Survey", "Lithology", "Assay" og "Vannforende". Under "Collar" ble ID knyttet til x,y,z koordinater og max dybde. Under "Survey" ble testbrønnene og totalsonderboringenes fall og fallretning gitt. Under "Lithology" ble intervallinformasjon angående hvilke løsmasser som befant seg nedover gitt, i tillegg til bergoverflaten og hvor langt ned det ble boret. Under "Assay" ble punktinformasjon fra XRD-analysene i testbrønn EB3 gitt. Fanen "vannforende" inneholdt intervallinformasjon om et vannførende lag i testbrønn EB3. Alle fanene ble lagret i CSV-format for å kunne benyttes som inputdata i Leapfrog.

Når dataen ble lagt inn i Excel var det viktig at ID og intervallinformasjonen var gitt for hele borehullet/totalsonderboringen. Alle testbrønnene og totalsonderboringene har markert dybden til fjell. Totalsonderboringene er lagt 3 meter ned i berggrunnen, testbrønnene er opp til over 200 meter ned i berggrunnen.

Selvom det i virkeligheten vil være borehullsavvik, ble testbrønnene og totalsonderboringene antatt vertikale nedover i grunnen. Den reelle situasjonen er at borehull kan avvike langt fra vertikale hull. 3D modellen skulle vise hvor de ulike



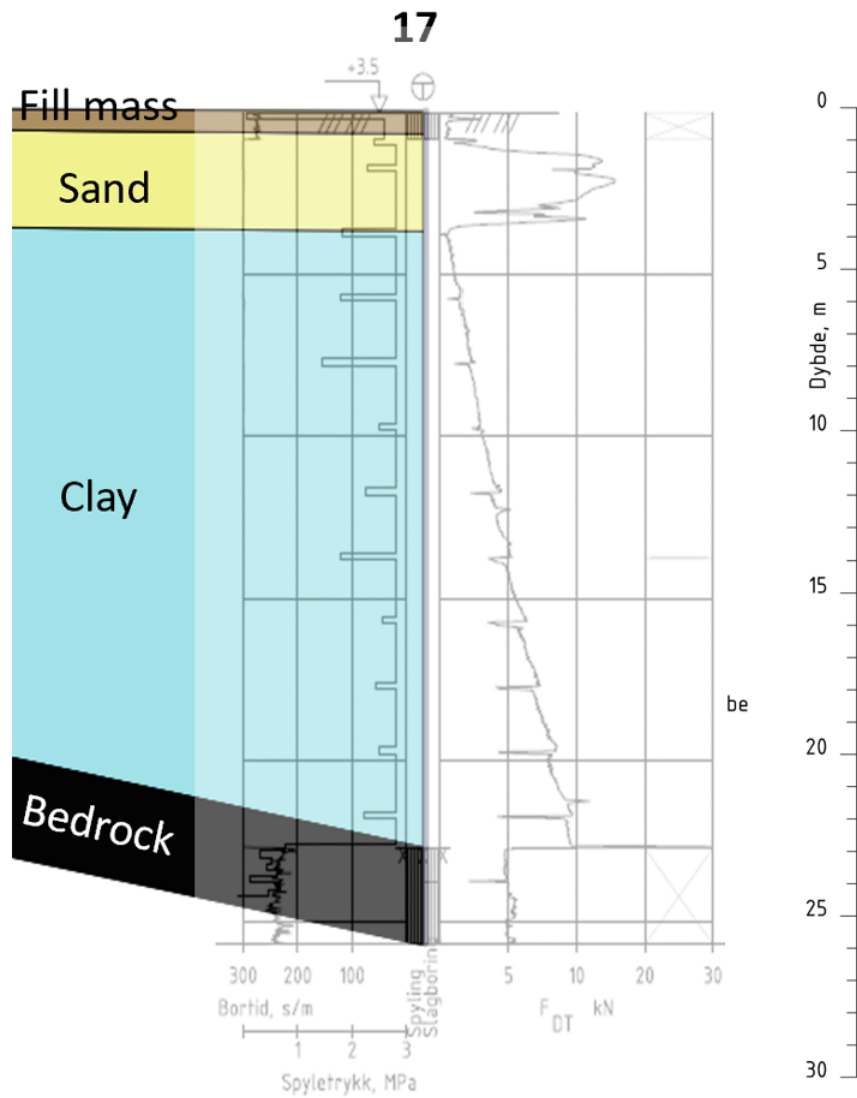
grunnundersøkelsene var gjennomført og hvilke resultater de viste. Derfor ble det avgjort å sette alle undersøkelsene som vertikale.

En digital terrengmodell ble lastet ned fra hoydedata.no og lagt inn i Leapfrog. En dybdemodell ble også lagt inn for å få frem fjordbunnen i modellen. Da ble høydekvoter hentet fra geonorge.no i form av en FGDB-fil. Dette formatet støttes ikke av Leapfrog, men ble lagt inn i ArcGIS for å kunne lage shapefiler som deretter kunne tas inn i Leapfrog.

En geologisk modell av grensen mellom berg og løsmassene ble modellert inn i Leapfrog. Grensen baserte seg da på dybden til fjell i testbrønnene og totalsonderboringene. En avgrensning ble også modellert inn som en ”polyline” for å hindre modelleringen av løsmasser å gå inn i fjellkanten. Et vannførende lag i testbrønn EB3 ble også modellert inn basert på resultater fra fiberoptiske målinger gjennomført i borehullene. To tverrsnitt ble også produsert for å vise hvordan berg- og løsmasse kontakten lå. Høydekurver ble også lagt inn i modellen for å enklere se topografien.

Et ortofoto av Nyhavna ble også importert inn i Leapfrog som et kart, her ble bildet festet til topografien og viser veier, bygninger etc.

Totalsonderboringene gjennomført av Multiconsult var tolket av Jonatan Emil Sjøberg Wiede og Sivert Wibe Langelo, deretter kvalitetssjekket av geotekniker Anders Samstad Gylland fra Multiconsult. Disse tolkningene ble grunnlaget for løsmasselagene i grunnen. For å få mektigheten på de ulike løsmasselagene ble tolkningene lagt ved dybdeskalaene gitt av multiconsult i rapporten Romstad (2024). Se figur 5.18 for et eksempel på hvordan resultatet fra totalsonderboringen ble lagt ved en korresponderende dybdeskala hentet fra multiconsult. Mektigheten til de alle 18 totalsonderboringene ble da funnet ved å benytte linjal og se på tilhørende dybdeskala.



**Figur 5.18:** Eksempel på resultatet fra totalsonderboring nr. 17 og tilhørende tolkning gjort av Jonatan Emil Søberg Wiede og Sivert Wibe Langelo. Her har en tilhørende dybdeskala blitt lagt ved for å finne mektigheten til de ulike lagene. Totalsonderboringresultatet er hentet fra Romstad (2024).

## 6 Resultater

### 6.1 Kaksprøver

Alle kaksprøvene fra boringen ble samlet inn og studert, se beskrivelse av hver enkelt i vedlegg figur B.1. Prøvene ble delt inn i tre grupper basert på visuelle trekk, se figur 6.1, 6.2 og 6.3.

Gruppe 1 begynner fra kaksprøve 6 frem til kaksprøve 30, se figur 6.1. Disse kaksprøvene hadde tydelige likhetstrekk, da en større andel mafiske mineraler, et tydelig grønnskjær og lite lysreflekterende materiale. Kaksprøver i dette intervallet som ikke lignet gruppespesifikasjonene var prøve nr. 20, 21 og 18. Kaksprøvene 20 og 21 utgjør gruppe 2, se figur 6.2. Kaksprøve 18 var en av de som skilte seg tydelig ut fra resten, da vet at den hadde en veldig mørk farge. Se bilde av prøve 18 i figur 6.4.



**Kaksprøve nr. 15**

**Figur 6.1:** Gruppe 1 under inndelingen av kaksprøvene basert på visuelle trekk, med tilhørende beskrivelse.

#### **GRUPPE 1**

Fra kaksprøve 6 – 30 var hovedtrenden:

- Et tydelig grønnskjær
- En større andel mafiske mineraler
- Lite lysreflekterende materiale.

Denne trenden gjelder med unntak av kaksprøve 20, 21 og 18.

Gruppe 2 besto av to kaksprøver som skilte seg tydelig fra den tidligere innsamlingen (se figur 6.2). Hovedtrenden her var flakete korn, størst andel felsiske mineraler

og tydelig lysreflekterende materiale i finstoffet og på korn. Kaksprøve 21 var kaksprøven med mest lysreflekterende materiale av alle innhentede prøver, og derfor ble denne valgt ut til XRD-analyse. Resultatene fra XRD-analysen kan ses under delkapittel 6.2 ved figur 6.5 og 6.6.



**Kaksprøve nr. 20**

### **GRUPPE 2**

Kaksprøve 20 og 21 viste en trend med:

- En større andel felsiske mineraler enn mafiske
- Flakete korn
- Tydelig lysreflekterende materiale på korn og i finstoffet

**Figur 6.2:** Gruppe 2 under inndelingen av kaksprøvene basert på visuelle trekk, med tilhørende beskrivelse.

Kaksprøve 33 frem til kaksprøve 69 ble inndelt i gruppe 3 (se figur 6.3). Fellestrekkene her var en stor andel felsiske mineraler, flere rødlige korn og lite lysreflekterende materiale. Kaksprøve 36 var et unntak i dette gruppeintervallet, se bilde av prøven i figur 6.4.



**Kaksprøve nr. 51**

### **GRUPPE 3**

Fra kaksprøve 33 – 69 viste hovedtrenden:

- Stor andel feldiske mineraler (kaket her var tydelig lysere enn gruppe 1)
- Flere rødlige korn
- Lite lysreflekterende materiale.

Denne trenden gjelder med unntak av prøve 36 som var mer rødlig

**Figur 6.3:** Gruppe 3 under inndelingen av kaksprøvene basert på visuelle trekk, med tilhørende beskrivelse.

Noen kaksprøver skilte seg ut ifra resten, da prøve 3, 18 og 36 (se figur 6.4). Av kaksprøvene som gikk til XRD-analysen var det kun prøve nr. 21 som skilte seg ut, resten representerte gruppene godt.

### **Kaksprøver som skilte seg ut fra gruppene**

**Kaksprøve nr. 3**



Tydelig mer feldiske mineraler enn kaksprøvene under gruppe 1

**Kaksprøve nr. 18**



Mørkeste kaksprøven av alle, tydelig grønnskjær

**Kaksprøve nr. 36**



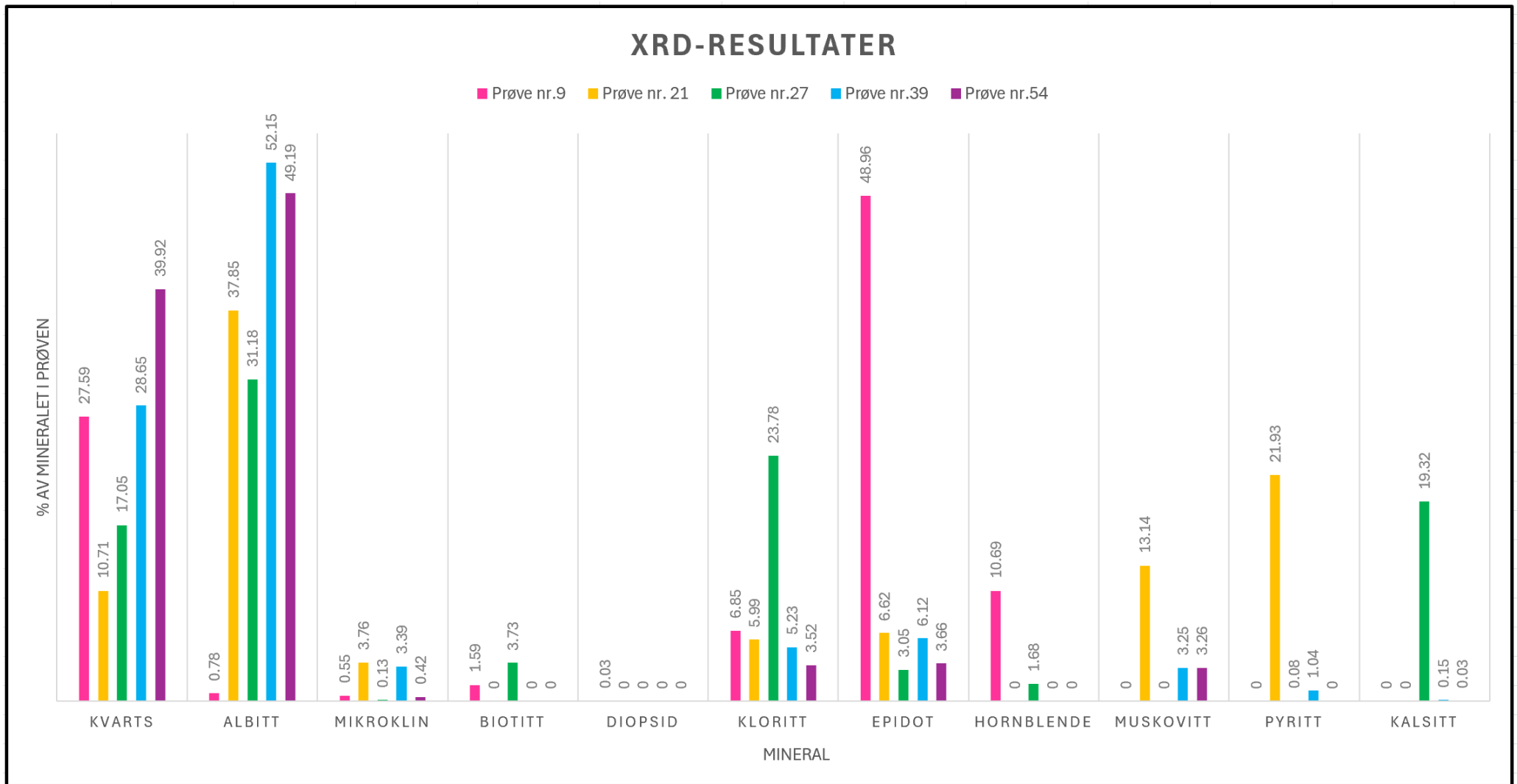
Tydelig rødligere farge enn de lignende kaksprøvene under gruppe 3

**Figur 6.4:** Bilde og beskrivelse av kaksprøver som skilte seg ut fra gruppene som kan ses i figurene 6.1, 6.2 og 6.3.

Kaksprøve 3 var første innhentede kaksprøve og hadde størst andel felsiske mineraler. Dette skilte seg tydelig fra gruppe 1 som begynte fra kaksprøve 6 (se figur 6.1). Kaksprøve 18 var mørkest av alle innsamlingene, men hadde ellers mange likhetstrekk med gruppe 1. Prøve 36 hadde mange likhetstrekk med gruppe 3, men skilte seg ut ved å være tydelig rødere.

## 6.2 XRD-analyse

Resultatene fra XRD-analysen ble fremstilt i et søylediagram i Excel, se figur 6.5. Dette ble gjort for å kunne sammenligne de ulike bestandelene av mineraler i de utvalgte kaksprøvene. Som tidligere nevnt ble kaksprøve 9, 21, 27, 39 og 54 valgt ut for XRD-analyse. Resultatene fra hver enkelt XRD-analyse sett i programmet Diffrac.TOPAS kan ses i vedlegg figur C.1, C.2, C.3, C.4 og C.5.

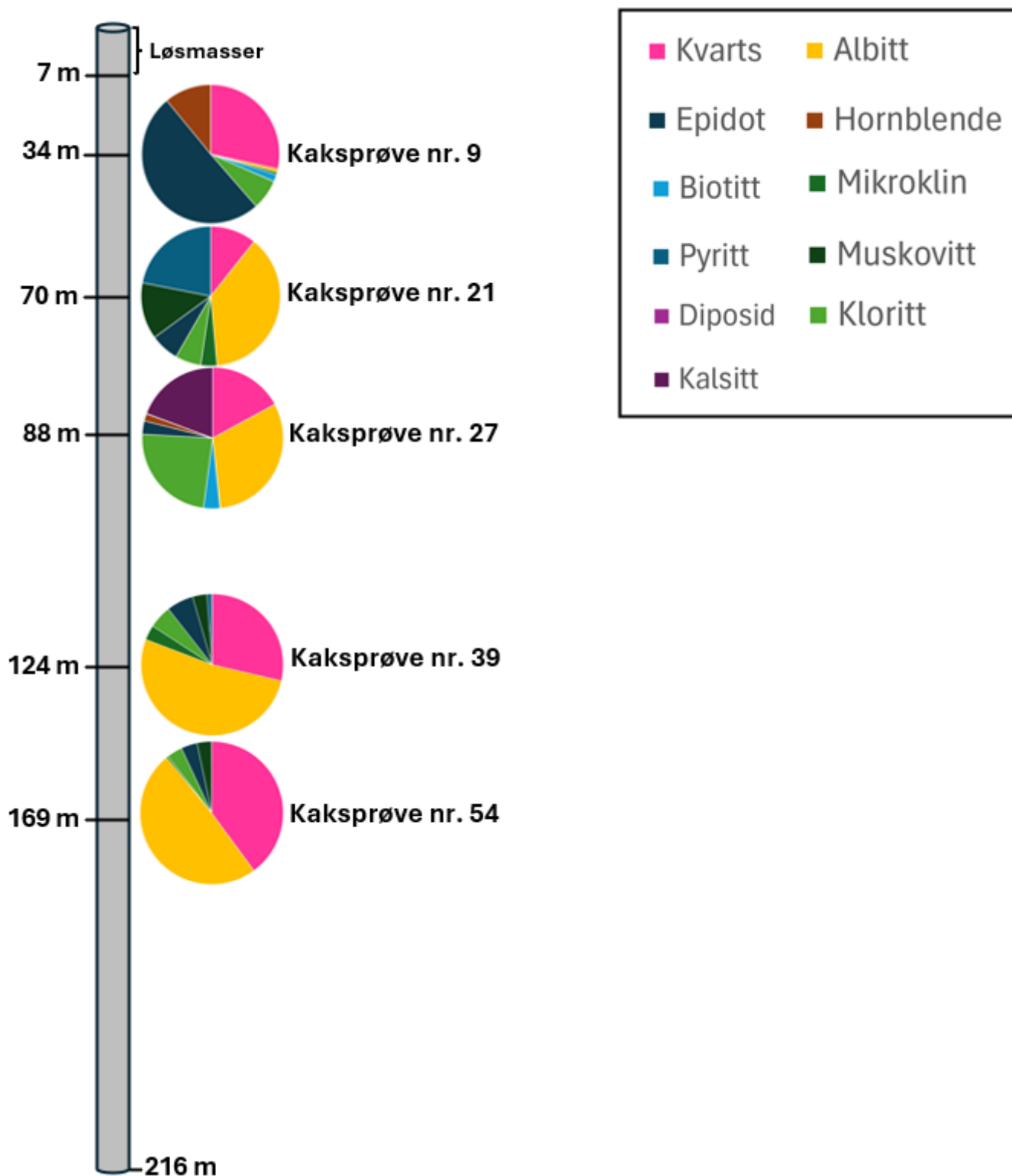


**Figur 6.5:** XRD-resultatene fra de 5 kaksprøvene fremstilt i et søylediagram. Y-aksen viser her prosentandelen av de ulike mineralene, x-aksen viser mineraltypen.

Det var en tydelig forskjell i de ulike mineralene og mengden av disse funnet i de fem kaksprøvene. Resultatene viser at alle prøvene består av en stor andel kvarts og albitt. Dette gjelder med unntak av prøve 9. som kun inneholder 0.78 % albitt. Kaksprøve 9 hadde en størst andel epidot, hele 48.96 %. Kaksprøve 27 hadde en mye større andel kloritt sammenlignet med de andre prøvene, da 23.78 %. Alle prøvene hadde en liten andel pyritt utenom kaksprøve 21 som besto av 21.93 % pyritt. En betydelig mengde kalsitt var kun å finne ved kaksprøve nr. 27, da på 19.32 %.

En illustrasjon av XRD-resultatene nedover i testbrønn 3 kan ses i figur 6.6. Her vil kvantiteten av de ulike mineralene nedover komme tydeligere frem.



**Testbrønn 3**

**Figur 6.6:** Illustrasjon av XRD-resultatene nedover i testbrønn 3. Her viser kakediagrammene andelen av de ulike mineralene for hver enkelt kaksprøve (prøve 9, 21, 27, 39 og 54). Ikke nøyaktig lengdeskala.

### 6.3 Teoretisk utledet varmeledningsevne basert på XRD-resultatene

Den teoretiske varmeledningsevnen ble regnet ut ved hjelp av formelen 11. Dette resulterte i utledningen av 5 teoretiske varmeledningsverdier, se tabell 7.

Kaksprøve [nr.]	Teoretisk varme- ledningsevne [ $\lambda_{\text{teoretisk}}$ ]
9	4.52
21	8.53
27	4.20
39	4.39
54	4.77

**Tabell 7:** Tabell over de utledede teoretiske varmeledningsevnene basert på XRD-resultatene som kan ses i figur 6.5.

### 6.4 Tetthet av kjerneprøvene

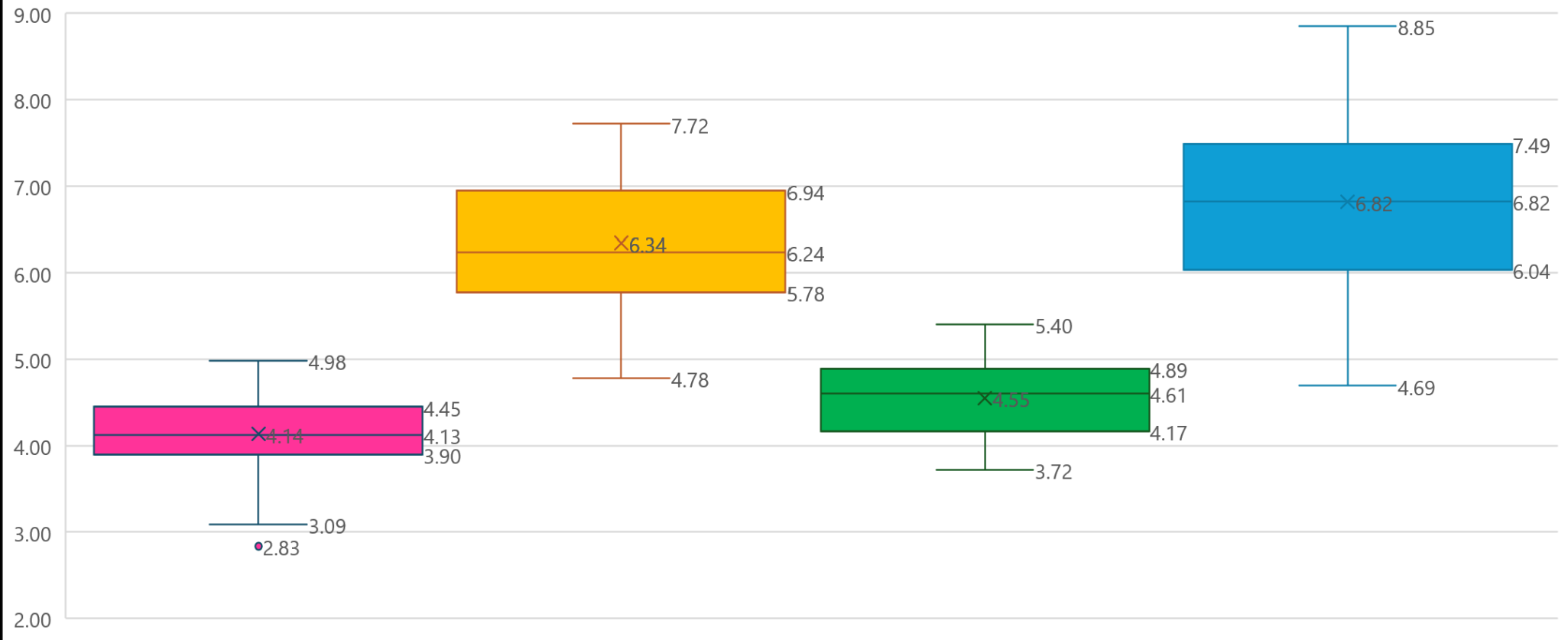
Tettheten til kjernene som skulle benyttes for punktlasttesting ble regnet ut. Et gjennomsnitt av de utregnede tetthetene ga en  $\rho$  verdi på 39.70. Dette er basert på utregning av tetthet ved formel 5 på 18 kjerner.

### 6.5 Punktlasttest av kjerneprøver

Det ble gjennomført diametral- og aksialtest på 56 kjerner tilsammen. 28 av kjernene var varmet opp, 28 var ikke varmet opp. Resultatene etter punktlasttestene ble fremstilt i et boksplokk, se figur 6.7. Inkludert diametral- og aksialtest på de varmede og ikke-varmede kjernene ble det totalt gjennomført 244 punktlasttester. Av disse var 28 tester ikke-godkjente. Alle de gjennomførte punktlasttestene kan ses i vedlegg i tabell A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6.

### Resultatene fra punktlasttestene gjennomført på varmede og ikke-varmede kjerner

- Is (50) ved diametral test av ikke-varmede kjerner
- Is (50) ved aksial test av ikke-varmede kjerner
- Is (50) ved diametral test av varmede kjerner
- Is (50) ved aksial test av varmede kjerner



**Figur 6.7:** Boksplokk av resultatene fra punktlasttestene produsert i Excel. Resultatene fra de varmede og de ikke-varmede kjernene er fremstilt i samme boksplokk. Her representerer y-aksen den korrigerede punktlaststyrkeindeksen  $I_s$ .

Styrkeanisotropiindeksen  $I_a$  for de varmede kjernene var på 0.67, kontrollgruppen hadde en  $I_a$  på 0.65. Det var noe forskjell i hvordan bruddflatene så ut etter at bruddet hadde gått. Enkelte hadde renere bruddflater enn andre, noe som tyder på en noe sterkere bergmasse. Brudd der kontaktflatene er med oppknuste tyder på en noe svakere bergmasse. Figur 6.8 viser en noe oppknust bruddflate etter en diametral punktlasttest.



**Figur 6.8:** Bilde av en bruddflate etter gjennomført diametral punktlasttest. Her ser man at flaten er noe oppknust.

## 6.6 Kategorisering av kjerneprøver

Som tidligere nevnt ble kjernene delt inn i tre kategorier basert på visuell observasjon av sprekker. Kategorien indikerte den tenkte kvaliteten til kjernen, da enten "God", "Ok" eller "Dårlig". For å se om det var noen forskjell i den korrigerte punktlaststyrkeindeksen mellom kategoriene, ble gjennomsnittet av de ulike (bra, ok, dårlig) regnet ut. Her ble de to minste og de to største verdiene i testtypen (diametral, aksial) sett vekk ifra. Gjennomsnittsverdiene og antall ikke-godkjente

under de ulike kategoriene kan ses i tabell 8.

Testtype	Kategori	Gjennomsnitt $I_s(50)$	Antall ikke-godkjent
Diametral (Varmede kjerner)	God	4.57	3
	Ok	4.53	1
	Dårlig	4.38 (median)	3
Aksial (Varmede kjerner)	God	6.95	7
	Ok	6.82	2
	Dårlig	6.07	0
Diametral (Ikke-varmede kjerner)	God	4.22	1
	Ok	3.94	1
	Dårlig	4.00	2
Aksial (Ikke-varmede kjerner)	God	6.49	2
	Ok	6.11	5
	Dårlig	6.00	1

**Tabell 8:** Gjennomsnittsverdiene av korrigert punktlaststyrkeindeks til de ulike kategoriene (god, ok, dårlig) ved de diametrale- og aksiale punktlasttestene. Antall ikke-godkjente under de ulike kategoriene kan også ses.

## 6.7 Termisk responstest av borehullene

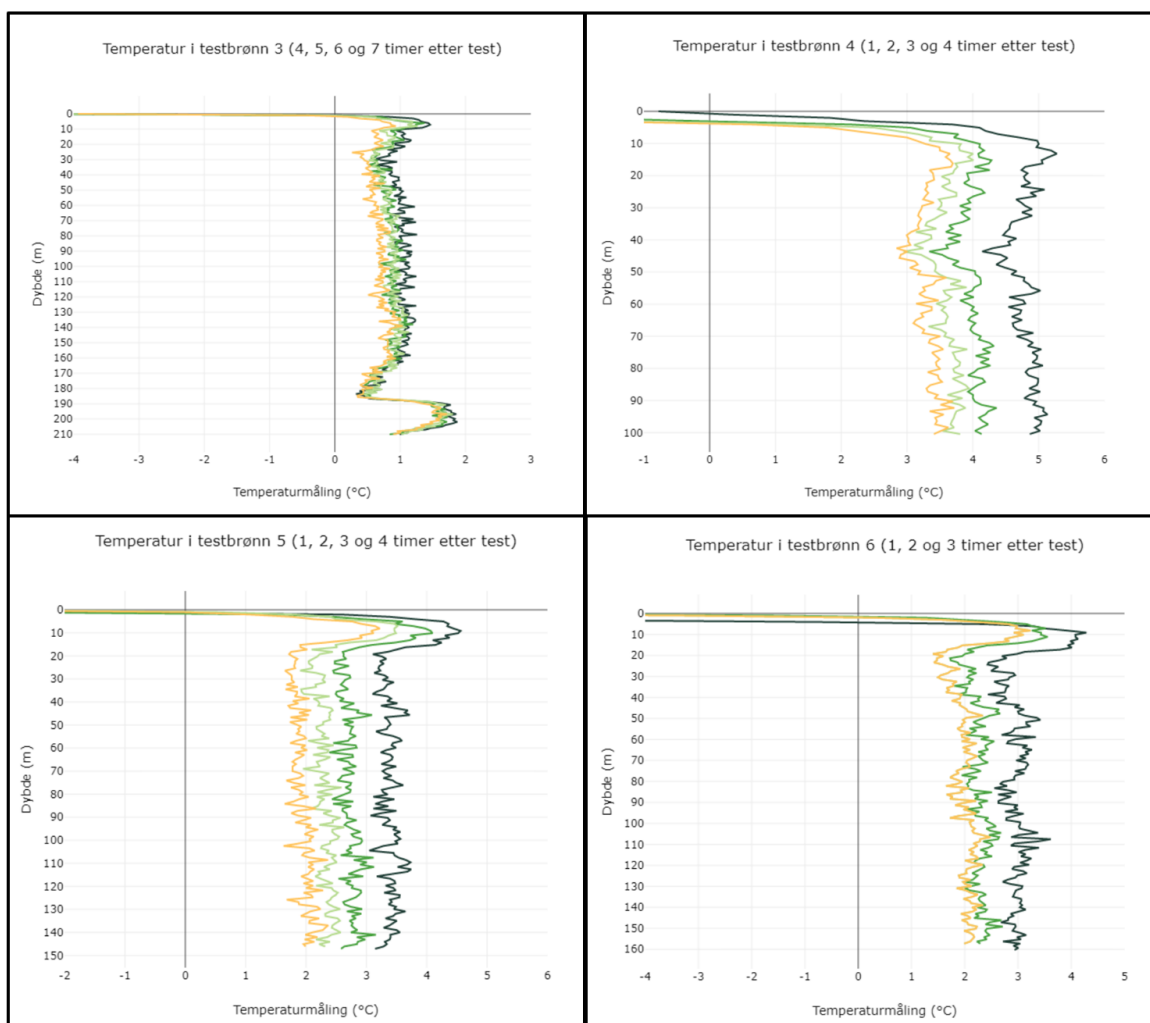
Termiske responstester ble gjennomført i alle testbrønnene av Asplan Viak. Resultatene fra disse testene vil avdekke berggrunnens effektive varmeledningsevne, termiske borehullsmotstand og uforstyrrede temperatur.

Resultatene fra de termiske responstestene gjennomført i testbrønnene kan ses i tabell 9, disse resultatene er utarbeidet av Asplan Viak. Disse resultatene er tatt med for å senere kunne diskutere om området er egnet for etablering av et høytemperatur sesongvarmelager. Ved vurderingen av dette vil resultatene fra de termiske responstestene stå sentralt.

Testbrønn [nr]	Uforstyrret temperatur [°C]	Effektiv varme- ledningsevne [W/m*K]	Termisk borehulls- motstand [m*K/W]
EB1	8.6	4.2	0.075
EB2	8.55	4.0	0.065
EB3	9.3	6.2	0.080
EB4	8.5	3.8	0.065
EB5	8.7	3.8	0.070
EB6	8.8	3.5	0.070

**Tabell 9:** Resultatene fra termiske responstester i testbrønnene på Nyhavna gjennomført av Asplan Viak. Den uforstyrrede temperaturen, den effektive varmeledningsevnen og den termiske borehullsmotstanden blir gitt for hvert borehull.

Basert på temperaturmålinger tatt av Asplan Viak i testbrønnene er det kun en brønn som treffer et vannførende lag. Dette er da testbrønn 3. Rapporten Ramstad og Holmberg (2020) utarbeidet av Asplan Viak konkluderer med at temperaturmålingene ikke viser tegn til grunnvannsbevegelser i testbrønn 1 og 2. Resultatene etter fiberoptiske målinger tatt i testbrønn 3,4,5 og 6 kan ses i figur 6.9. Disse resultatene er gjennomført og produsert av Asplan Viak. De er med i denne rapporten siden de utgjør grunnlaget for modellering av vannførende lag i 3D modellen. Temperaturprofilmålingene er også med siden de spiller en sentral rolle i om området på Nyhavna er egnet for etablering av en geotermos. Flere aspekter ved dette vil diskuteres under diskusjonen.



**Figur 6.9:** Fiberoptiske temperaturprofilmålinger tatt i testbrønn nr. 3, 4, 5 og 6. Disse resultatene er produsert av Asplan Viak.

## 6.8 3D-modell i Leapfrog Geo

En 3D modell ble laget i programmet Leapfrog Geo. Skjerm bilde av inputfilene i Leapfrog kan ses under vedlegg figur D.1, D.2, D.3, D.4, D.5, D.6 og D.7. Denne modellen skal representere testbrønnene og grunnforholdene på Nyhavna. Totalsonderboringer gjennomført av Multiconsult ble modellert inn i 3D modellen i Leapfrog for å vise løsmassefordelingen på Nyhavna. Dybden til fjell er også representert i modellen, og kontakten mellom berg og løsmasser er modellert inn. I modellen vises:

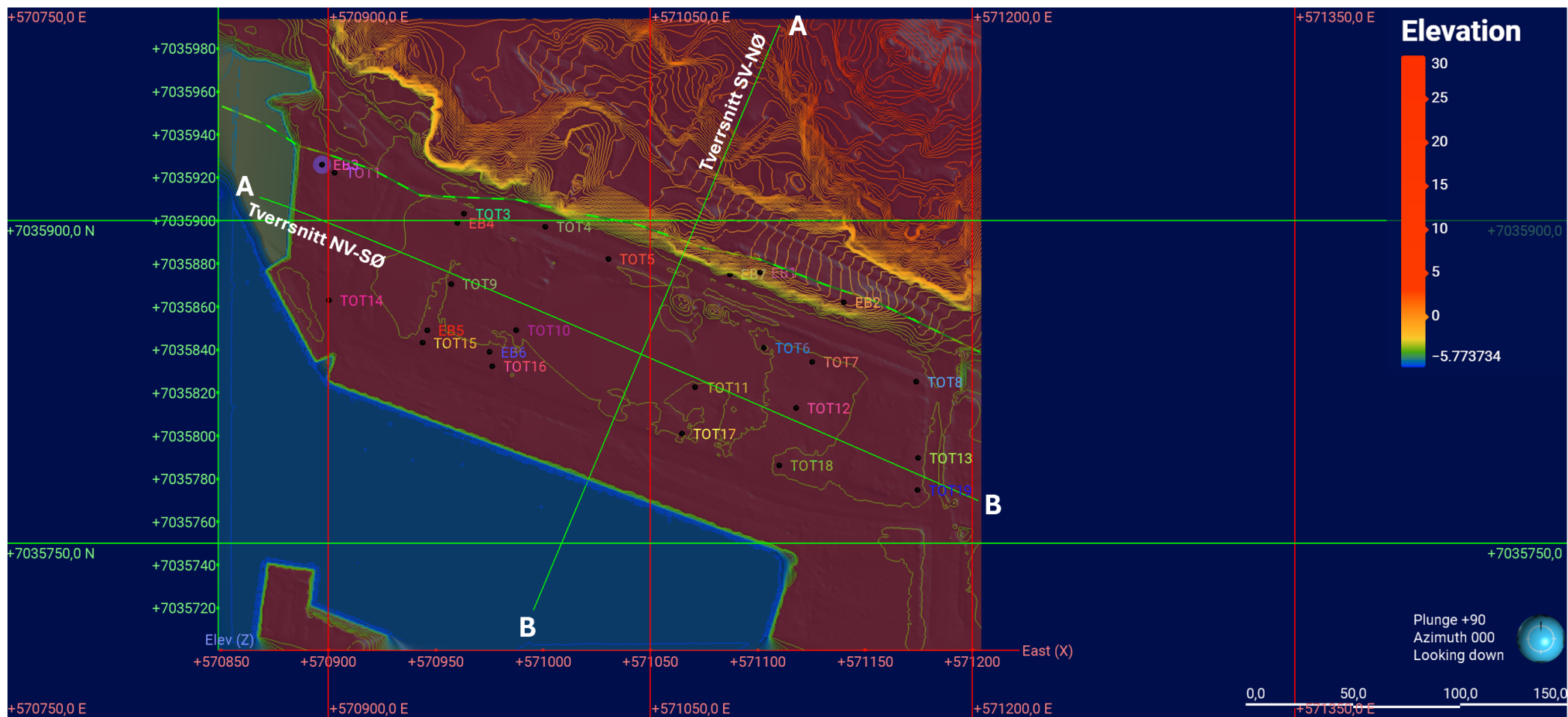
- De 7 testbrønnene boret på Nyhavna med dybden til fjell og maksimal dybde

- 18 totalsonderboringer gjennomført av Multiconsult med informasjon om de ulike løsmasselagene
- 5 XRD-resultater med tilhørende boredyp i testbrønn EB3
- Berg- og løsmasse kontakten basert på testbrønnene og totalsonderboringene sin dybde til fjell
- Et vannførende lag i testbrønn EB3 basert på tolkninger av temperaturmålinger nedover i testbrønnene (kun vannførende lag i denne brønnen)
- To tverrsnitt som kutter igjennom modellen for å få frem berg- og løsmasse kontakten

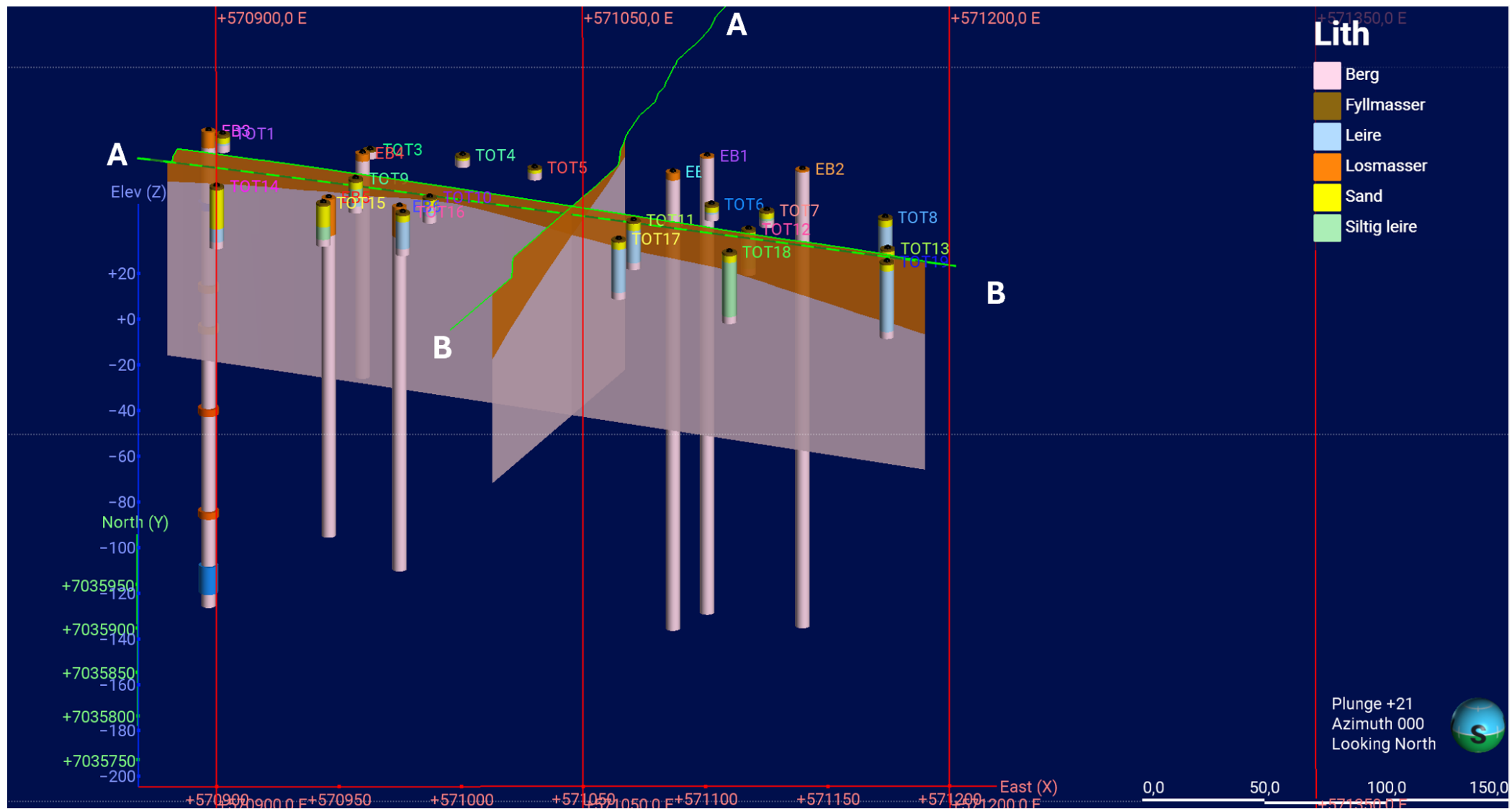
I tillegg har modellen en digital terrengmodell, en dybdemodell og et ortofoto plassert inn i modellen. Dette ble laget av professor Steinar Løve Ellefmo ved NTNU.

Skjermbilder av 3D-modellen i Leapfrog kan ses i figur 6.10, 6.11 og 6.12 og 6.13. Figur 6.10 viser 3D-modellen ovenifra med borehullsIDene til de syv testbrønnene og de 18 totalsonderboringene, de to tverrsnittene, avgrensningen langs fjellblotningen og høydekurvene som får frem topografien. Avgrensningen viser hvor modelleringen av berg- og løsmassegrensen stopper. Her har litologiene blitt fjernet for å få IDene tydeligere frem. Figur 6.11 viser tverrsnittene uten topografien, her kommer berg- og løsmasse grensen frem. Testbrønnene og totalsonderboringene er også inkludert. Figur 6.12 er et skjermbilde av modellen fra siden der alt vises. Her har markeringer blitt gjort for å få frem totalsonderboringene og testbrønnene, forskjellen mellom disse er tydelig ved å se på dybden ned i berg. Totalsonderboringene er kun boret 3 meter ned i berg, mens testbrønnene ligger på opp til over 200 meter ned i berg. Merk at borehullsavvikene ikke er tatt hensyn til. Berg- og løsmassekontakten er også markert, og den strekker seg langs hele modellen. XRD-resultatene og det vannførende laget i testbrønn EB3 er også markert inn. Den digitale terrengmodellen med høydekurver og fjordbunnen kan også ses på bildet. Figur 6.13 viser totalsonderboringene på nærmere hold, for å få frem de ulike løsmassene. To tverrsnitt ble også tatt av modellen for å få frem berg- og løsmassekontakten, se figur 6.14 og 6.15.

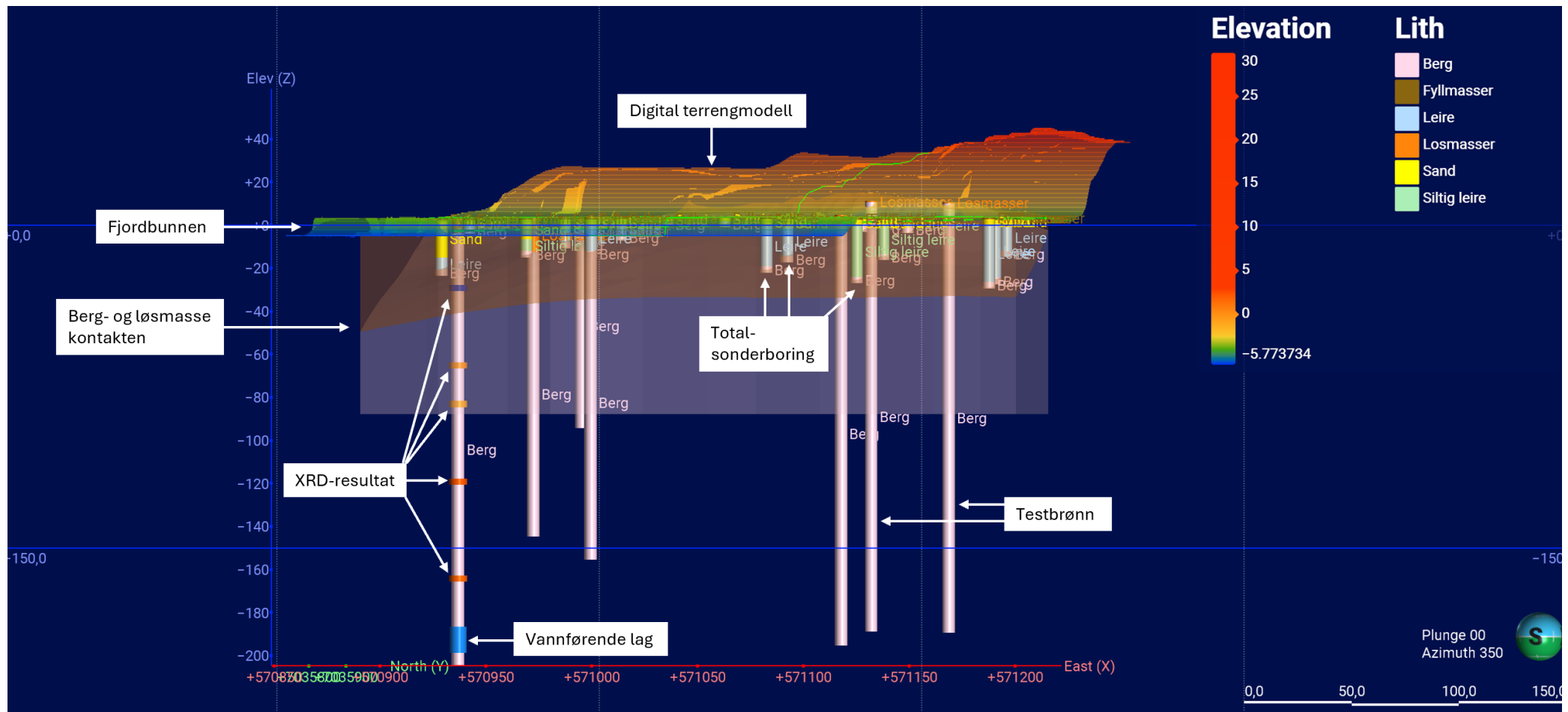




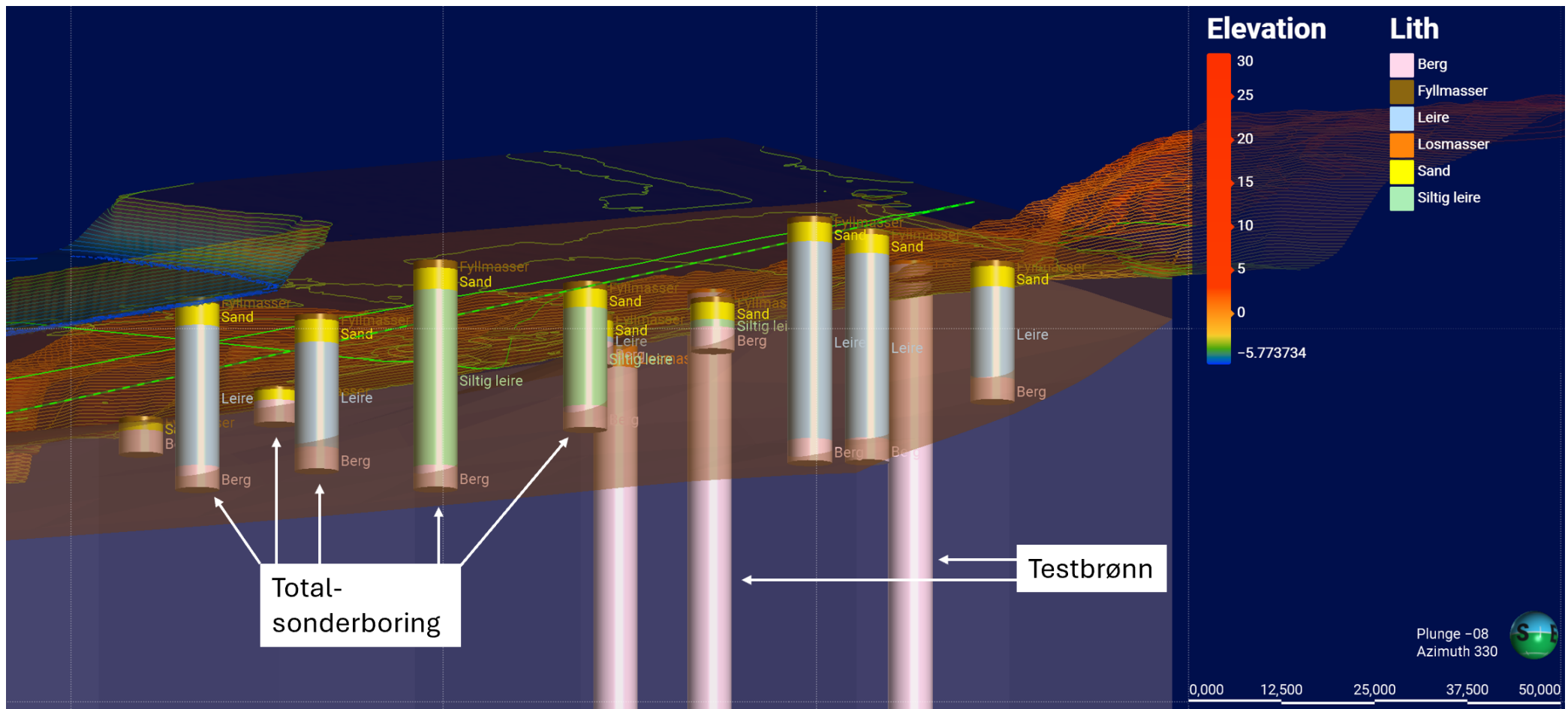
**Figur 6.10:** Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog der borehullsIDene, tverrsnittene, avgrensningen og høydekurver kommer frem. Avgrensningen gjort for berg- og løsmasse modellen er den stiplede linjen langs fjellblotningen. Ortofotot er ikke med på bildet for å få med koordinat aksene X og Y (modellen med ortofoto kan ses i vedlegget). "Elevation" her står for høyde over terrengoverflaten.



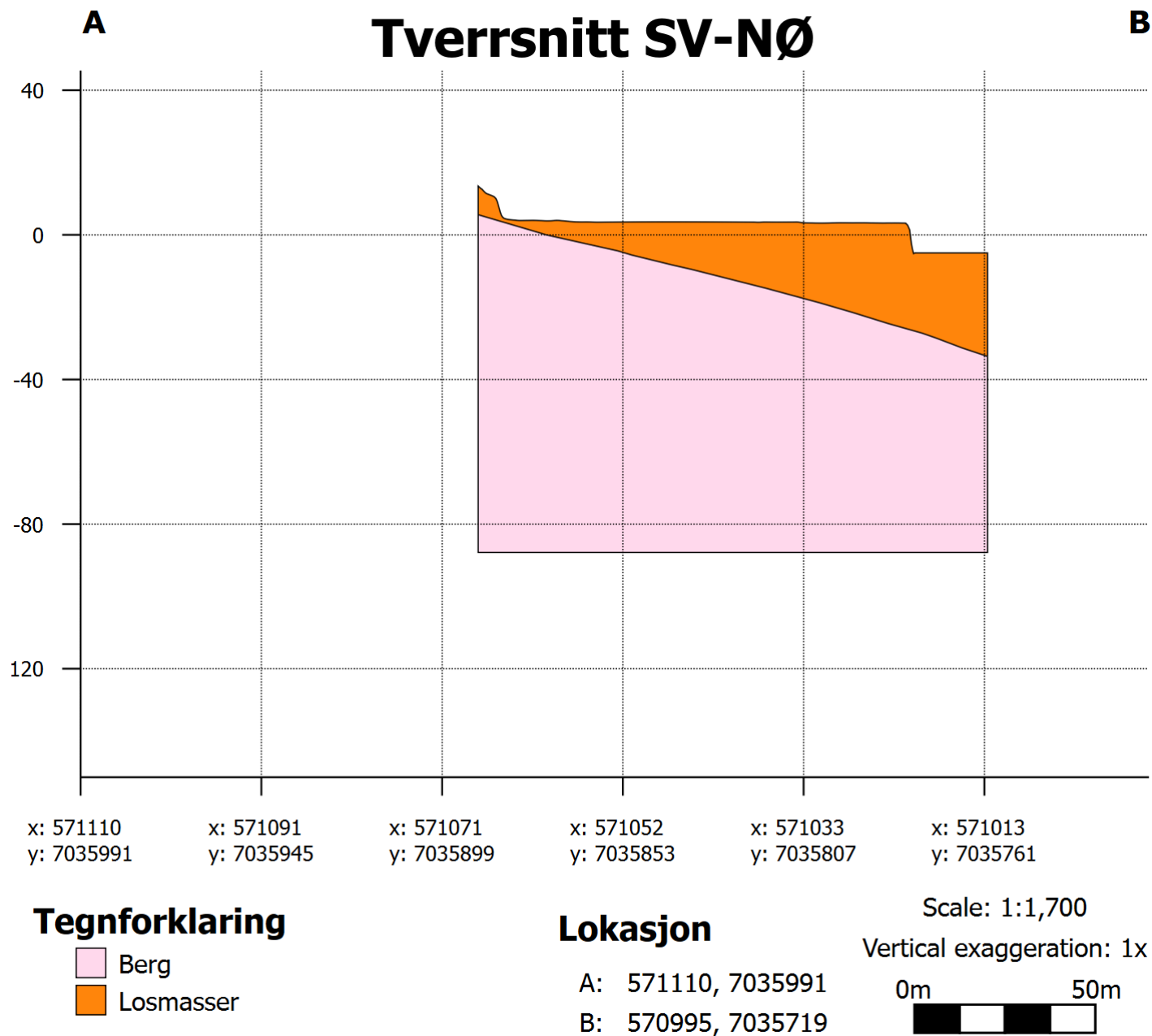
**Figur 6.11:** Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog med tverrsnittene, testbrønnene og totalsonderboringene.



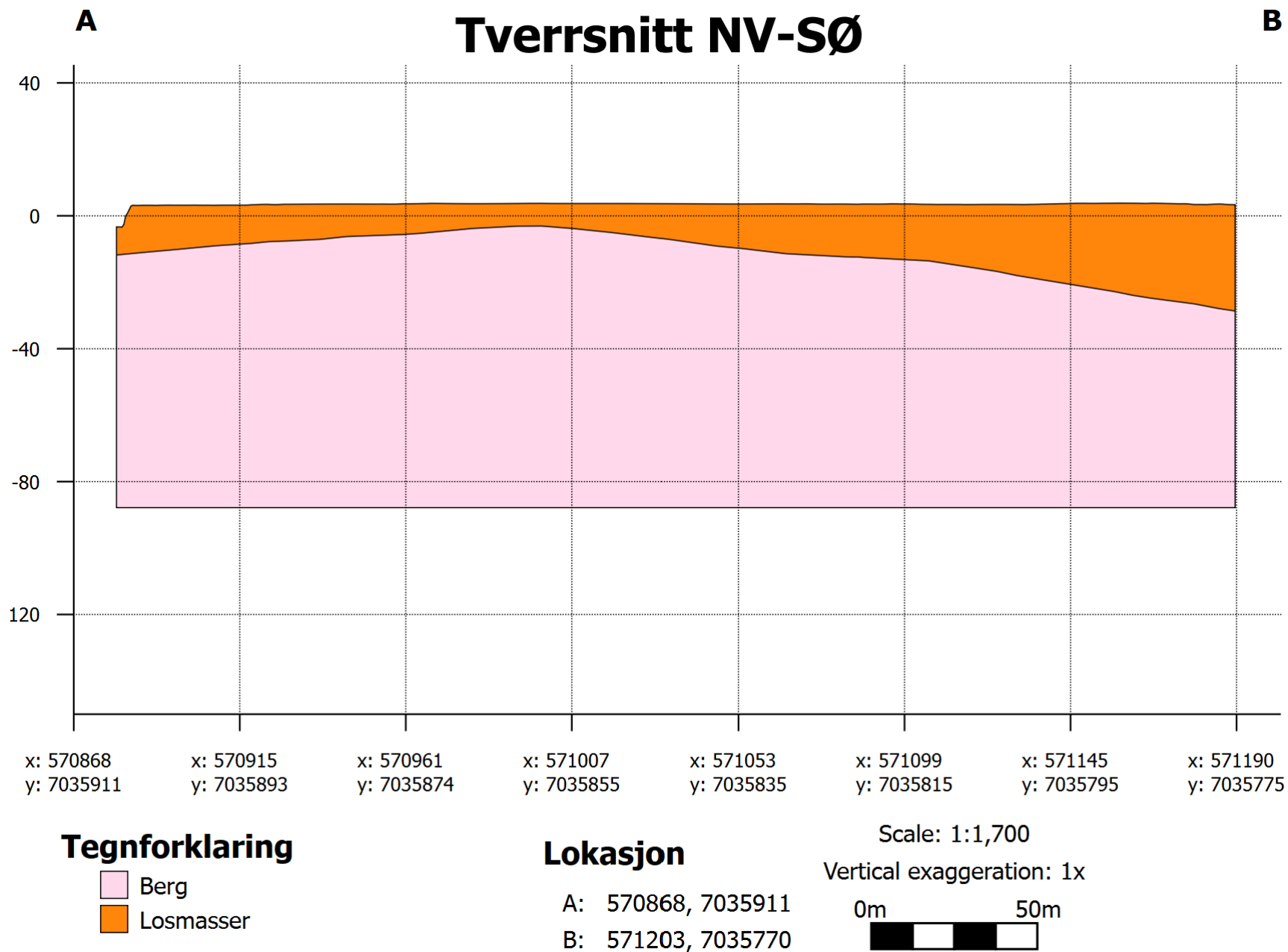
**Figur 6.12:** Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog med markeringer. Testbrønnene og totalsonderboringene går vertikalt ned og borehullsavvikene ved boringen er ikke tatt hensyn til. Her er ikke alle testbrønne og totalsonderboringene markert, men den tydelige forskjellen i dybde skiller dem. Totalsonderboringene ligger tre meter ned i berggrunnen, mens testbrønnene kan ligge opp til over 200 meter ned. Løsmasselagene kommer frem ved totalsonderboringene. Berg- og løsmassekontakten strekker seg over hele modellen, det oransje feltet er løsmassene og det rosa representerer berggrunnen. Se også XRD-resultatene, den digitale terrengmodellen, fjordbunnen og et vannførende lag i modellen. Nærmere bilde av totalsonderboringene kan ses i figur 6.13



**Figur 6.13:** Skjerm bilde av 3D-modellen i Leapfrog av totalsonderboringene. Her har borehullsIDene blitt fjernet for å få frem litologiene. Testbrønnene er også markert inn for å illustrere forskjellen på de. Igjen ses forskjellen på dybden ned i berggrunnen.



**Figur 6.14:** Tverrsnitt som går fra SV-NØ i 3D-modellen i Leapfrog. Dette skal få frem berg- og løsmassekontakten. Se hvor tverrsnittet går i figur 6.10



**Figur 6.15:** Tverrsnitt som går fra NV-SØ i 3D-modellen i Leapfrog. Dette skal få frem berg- og løsmassekontakten. Se hvor tverrsnittet går i figur 6.10

## 7 Diskusjon

### 7.1 Feilkilder

Analysen gjennomført ved denne masteroppgaven har flere mulige feilkilder. Når kaksprøvene ble innhentet var ordentlig vasking av prøvetakningsutstyret essensielt. Dette var spesielt viktig i forhold til at fem kaksprøver senere ble valgt ut for XRD-analyse. Dersom borekakset fra et gitt boredyp inneholdt rester fra tidligere innhentninger, vil det kunne påvirke XRD-resultatet i stor grad. Alle mineraler og kvantiteten av disse kommer frem ved en slik analyse, selv små andeler. Den visuelle vurderingen av kakset ville også kunne blitt misvisende dersom en prøvepose inneholdt kaks fra flere boredyp. Under boringen ble bøtten og hanskene spylt grundig med vann mellom hver prøvetakning. Dermed er en stor krysskontaminering mellom prøvene usannsynlig. En stor mengde prøvemateriale ble innhentet for hver kaksprøve, derfor måtte prøven splittes gjentatte ganger for å nå en ønsket prøvevekt på rundt 30 gram. Flere splittings av prøven vil gjøre en liten kontaminering enda mindre.

Registrering av feil bordyp for en kaksprøve ble unngått ved å telle antall borstenger igjen i magasinet. Det er likevel mulighet for feil registrering. Kaksprøvenes tilhørende boredyp har ikke hatt en veldig essensiell rolle i denne masteroppgaven i forhold til analysen.

Stor variasjon i kakset var ikke å forvente basert på berggrunnskartet over området (se 4.4), dermed ble det valgt å kun ta en prøvetakning for hver niende meter. Det var ikke mulig å visuelt vurdere kakset som kom ut til en hver tid, og eneste mulige vurdering var ved prøvetakning. Dette førte til at dersom det kom noe uventet mellom de ni prøvetakningsmeterne, vil det ikke detekteres. Det mest ideelle hadde vært om kakset var tørt og det var mulig å gjøre en kontinuerlig visuell observasjon. Dersom en rekke kaksprøver har samme visuelle trekk etter hverandre, indikerer dette at den mellomliggende bergmassen ser lik ut. Dette var ofte tilfellet under boringen, der spesielt gruppe 3 (se 6.3) utgjorde mange kaksprøver etter hverandre med like trekk.

De utvalgte kaksprøvene til XRD-analyse skal representere berggrunnen nedover i borehullet. Derfor vil det være essensielt at utvelgelsen er god, ellers vil XRD-analysen ikke gi et inntrykk av de generelle trendene i borehullet. Ved å dele inn kaksprøvene i tre grupper (se 6.1, 6.2, 6.3) ble det lettere å se de generelle trendene og gjøre utvelgelsen basert på dette. Derfor vil de utvalgte kaksprøvene trolig representere borehullet godt. Bergarten borehullet består mest av vil ha størst innvirkning på lagerets egenskaper. Derfor vil denne bergmassens teoretiske varmeledningsevne være viktigst. Flere XRD-analyser ville gitt mer data og en bedre representasjon av borehullet. Da ville mulige feilvurderinger knyttet til den visuelle vurderingen og den subjektive utvelgelsen blitt mindre.

Under prepareringen av prøver for XRD-analyse var det flere mulige feilkilder. Som nevnt under metoden 5.7.1 ble alt av utstyr blåst rent og vasket med alkohol mellom hver kaksprøve. At denne rensningen av utstyret var tiltrekkelig vil være essensiell, siden det er snakk om så små mengder materiale som skal detekteres. Dette vil være spesielt viktig ved nedknusning i de minste fraksjonene, ved benyttelse av svingskivemøllen og den mikroniserende møllen. Ved de minste fraksjonene vil kontaminering mellom prøvene kunne utgjøre en mer synlig del av prøveholderen som sendes til XRD-analyse. Dermed vil det være viktig å ha dette i bakhodet ved vurdering av XRD-resultatene. På den andre siden vil denne mulige kontamineringen utgjøre en veldig liten kvantitet av prøvematerialet. Dermed vil ikke dette ha en stor innvirkning på bestanddelene av ulike mineraler eller den utregnede teoretiske varmeledningsevnen.

Det er viktig å merke seg at det finnes noen usikkerheter knyttet til XRD-resultatene i seg selv. For en enda mer sikker analyse burde det blitt gjennomført XRF og studert tynnslip. I denne analysen var det vurdert som ikke hensiktsmessig.

Ved analysen i denne masteroppgaven har XRD-resultatene sine prosentandeler blitt lagt inn rett fra Diffrac.eva. Deteksjonsgrensen går egentlig ved 1 %, men her har ikke resultatene under deteksjonsgrensen blitt rundet opp til 1. Når det er funnet under 1 % av mineralet i prøven vil verdien være usikker. Derfor kan det diskuteres om verdiene det gjelder burde ha blitt rundet opp. Denne usikkerheten vil da gjelde alle de 5 XRD-resultatene.



Punktlasttestene ble gjennomført manuelt på PTS. Denne manuelle gjennomføringen kan lede til en rekke feilkilder. Den største feilkilden er knyttet til hvor fort prøven lastes. Dersom lasten påføres for fort eller for sakte, kan dette lede til at bruddet går ved en uvanlig last. Igjen vil det kunne argumenteres med at dersom prøvene er lastet feil vil dette gjelde for alle de 244 gjennomføringene, både de som har vært utsatt for sykliske oppvarminger og de som tilhører kontrollgruppen. Derfor vil mange gjennomføringer gjøre usikkerhetene relatert til den manuelle gjennomføringen av testen mindre.

Som nevnt under metoden 5.5 var en mulig usikkerhet knyttet til forflytning av kjernene prøvd unngått. Usikkerheten ble unngått ved å flytte de ikke-varmede kjernene i samme metallbeholdere like mange ganger frem og tilbake. Det var tenkt at siden kjernene ble flyttet så mange ganger (43 ganger frem og tilbake) vil det kunne ha en innvirkning på kjernenes styrke.

## **7.2 Er Nyhavna egnet for etablering av et sesongvarmelager?**

### **7.2.1 Termiske responstester i testbrønnene**

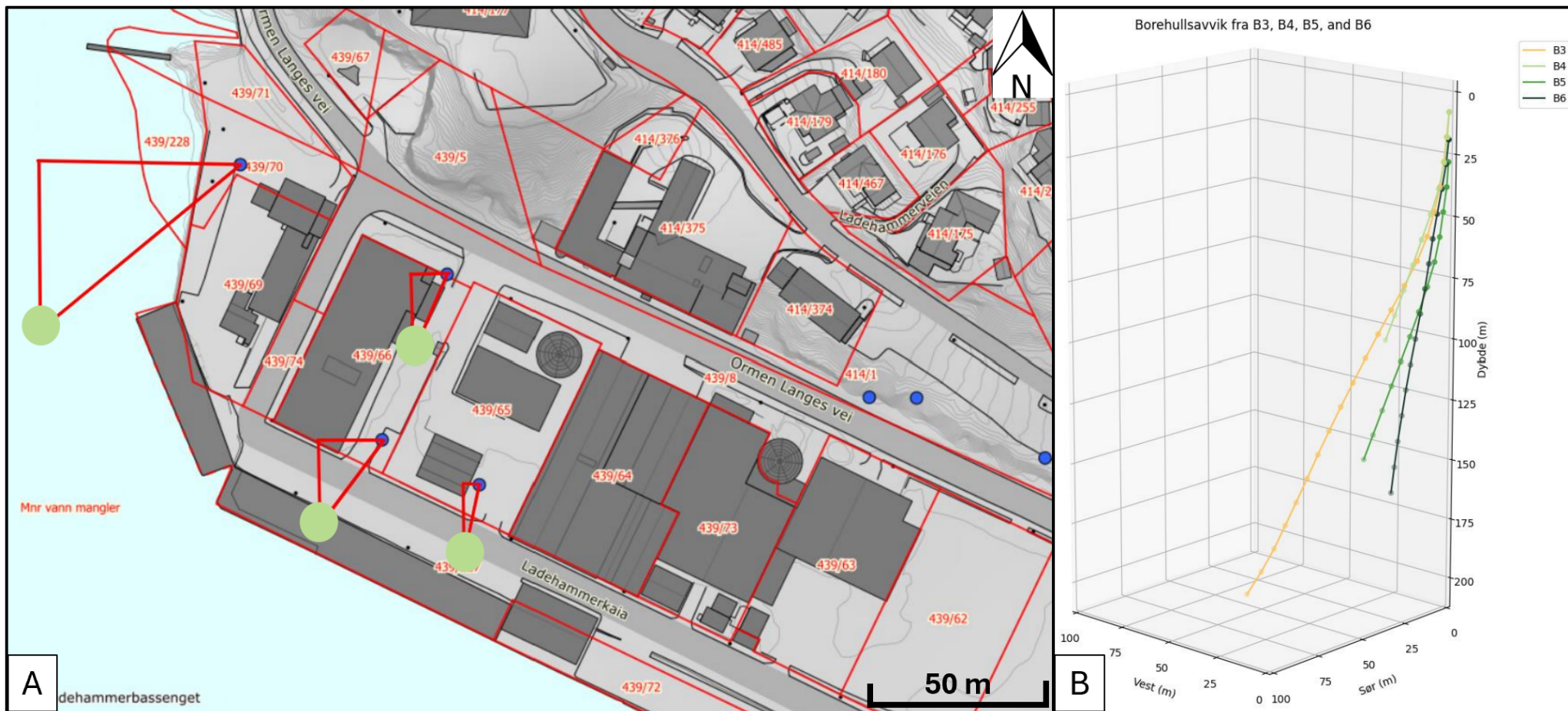
En stor vurdering ved denne oppgaven er hvor egnet Nyhavna er for etablering av et høytemperatur sesongvarmelager. For å kunne vurdere dette har hovedsaklig resultatene fra de termiske responstestene i borehullene blitt evaluert. Den effektive varmeledningsevnen og den termiske borehullsmotstanden kan ses i tabell 9. Disse effektive varmeledningsevnene til berggrunnen er typiske verdier for norsk berggrunn (Ramstad, 2011). Dette vil være egnede verdier for etablering av et sesongvarmelager. Når den effektive varmeledningsevnen er såpass høy, vil det medføre et noe større varmetap i kantene av lageret. På den positive siden vil avstanden mellom energibrønnene kunne være større. Selv om verdiene er høye, har berggrunnen de termiske egenskapene til å holde på den tilførte varmen. Den termiske borehullsmotstanden er lav for alle testbrønnene. Dette er gunstig fordi varmeoverføringen mellom kollektorvæsken og borehullet dermed er god.

### 7.2.2 Grunnvannsbevegelser

Eventuelle grunnvannsbevegelser i området vil også være av høy relevans, siden det vil ha stor innvirkning på om energilagring i grunnen er mulig. Som nevnt under 3.1.5 vil vannførende lag i grunnen transportere varme vekk fra lageret. Temperaturmålinger tatt etter gjennomført termisk responstest, med blant annet fiberoptiske kabler, kan vise hvor eventuelle vannførende lag går. De fiberoptiske målingene tatt i testbrønn 3, 4, 5 og 6 kan ses i figur 6.9. Som disse målingene viser, er det kun resultatene fra testbrønn 3 som tyder på et vannførende lag. Dette vannførende laget ligger da ved borede 190 til 203 meters boredyp. Ved plassering av sesongvarmelageret vil det dermed være hensiktsmessig å legge det så langt unna lokasjonen til testbrønn 3 som mulig. Siden ingen av de andre testbrønnene treffer noen vannførende lag, vil disse lokasjonene være mer heldige.

### 7.2.3 Vannførende lag sett i sammenheng med borehullsavvik

En figur som viser toppen og bunnen til testbrønn 3, 4, 5 og 6 kan ses ved A i figur 7.1. Selve borehullsavviket til disse brønnene kan ses ved B i figur 7.1. Testbrønn 4, 5 og 6 viser ikke til et stort borehullsavvik. Det er å forvente at borehullene ikke går vertikalt ned, men at noe avvik vil finne sted. Slik som figuren viser ligger bunnen av testbrønn 3 ute i fjorden som følge av borehullsavviket. I denne brønnen er det påvist et vannførende lag som muligens ble påtruffet grunnet det kraftige borehullsavviket. Det er større sannsynlighet for å treffe et vannførende lag under fjordbunnen, sammenlignet med på land. Dette vil da avhenge av sprekker og mulig lagdeling i berggrunnen, og tilhørende strøk og fall. Dersom dette er tilfellet, vil det vannførende laget blitt unngått dersom borehullsavviket var mindre. Dermed vil det ikke nødvendigvis ha negative konsekvenser dersom energibrønner i geotermosen er plassert i nærheten av testbrønn 3. Det vil likevel kunne være hensiktsmessig å prøve å unngå området der testbrønn 3 er lokalisert ved etableringen. Konsekvensene vil være store dersom flere brønner treffer et vannførende lag. Dersom plasseringen skulle blitt lagt i nærheten av testbrønn 3 kan retningsbestemt boring være en idé, for å minimere borehullsavviket.



**Figur 7.1:** A) kart som viser hvor bunnen (grønn prikk) og toppen (blå prikk) til testbrønnene 3, 4, 5 og 6 er. B) graf som viser borehullsavviket til testbrønn 3, 4, 5 og 6 (Randi Kalskin Ramstad, 2024, upublisert materiale).

### 7.2.4 Teoretisk varmeledningsevne og egnethet

Basert på resultatene fra XRD-analysen av kaksprøve 9, 21, 27, 39 og 54 ble den teoretiske varmeledningsevnen regnet ut. Denne teoretiske varmeledningsevnen vil også være en indikator på om berggrunnen i området er egnet for energilagring. De utregnede verdiene kan ses i tabell 7 og viser svært egnede verdier. Alle verdiene overskrider  $4.0 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ . Dette vil være en god varmeledningsevne for å kunne lede varme ned i lageret til oppladning og opp til uthentning. Det vil kunne være negativt at verdiene er såpass høye i forhold til lagerets kapasitet til å holde på tilførte varme, ved at varmetapet i kantene av lageret er noe større. Det vil uansett ikke være et problem, og berggrunnen er egnet for etablering. Her blir viktigheten av at prøvene valgt ut for analyse er representative for borehullet stor.

De teoretiske varmeledningsevnene funnet i denne analysen er noe høyere enn verdiene funnet for grønnstein i masteroppgaven til Sofie Hartvigsen og Johanne Strålberg (Strålberg & Hartvigsen, 2022). Denne sammenligningen blir gjort for å gjøre rede for hvor representative de teoretiske varmeledningsevnene i denne analysen er. Begge studiene tar for seg prøver i Trondheimsområdet. Merk at det ikke har blitt konkludert med noen bergartstyper i dette studiet, men gruppe 1 ser ut til å være grønnstein basert på visuell observasjon og mineralinnhold. Store mengder av kakset ser ut til å være en annen bergart bestående av mer felsiske mineraler og en høy andel kvarts, muligens kvartskeratofyr. De fem XRD-resultatene viser en stor mengden kvarts for alle prøvene, se tabell 10. En stor mengde kvarts i prøvene vil øke varmeledningsevnen, som nevnt under 3.3.3.

<u>Kaksprøve [nr]</u>	<u>Kvartsinnhold [%]</u>
9	27.6
21	10.7
27	17.1
39	28.7
54	39.9

**Tabell 10:** Kaksprøvenes kvartsinnhold i %.

Det ble sammenlignet med verdiene for grønnstein i Strålberg og Hartvigsen (2022) siden grønnstein er den dominerende bergarten på Nyhavna. Det vil være vanskelig å konkret kvantifisere volumet grønnstein og kvartskeratofyr i området. Ved sammenligning av de utregnede teoretiske varmeledningsevnene i dette studiet med Strålberg og Hartvigsen (2022) er det viktig å merke seg at de har gjennomført et større antall XRD-analyser.

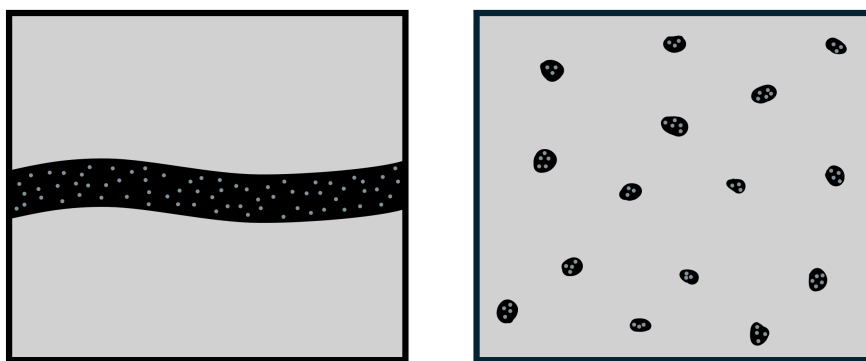
De teoretiske utregnede varmeledningsevnene er jevnt over høyere enn de effektive varmeledningsevnene funnet ved de termiske responstestene. Se sammenligning i tabell 11. Merk at de teoretiske verdiene er fra testbrønn 3, mens de effektive verdiene er fra alle testbrønnene. Som tabell 11 viser, så er de teoretiske varmeledningsevnene jevnt over høyere. Denne sammenhengen der de effektive varmeledningsevnene var høyere enn de teoretiske ble også funnet ved masteroppgaven Strålberg og Hartvigsen (2022). Gjennomsnittlig teoretisk varmeledningsevne og effektiv varmeledningsevne ble også regnet ut. Den effektive varmeledningsevnen på 6.2 W/m\*K fra testbrønn 3 ble sett vekk fra, siden den er påvirket av det vannførende laget.

<u>Teoretisk utregnet varmeledningsevne</u>	<u>Effektiv varmeledningsevne</u>
4.52	4.2
8.53	4.0
4.20	6.2
4.39	3.8
4.77	3.8
	3.5
<hr/>	
<b>Gjennomsnitt: 5.28</b>	<b>Gjennomsnitt (uten 6.2): 3.86</b>

**Tabell 11:** Sammenligning av teoretisk utregnet varmeledningsevne (fra kaksprøver i testbrønn 3) med effektiv varmeledningsevne (fra testbrønn 1, 2, 3, 4, 5 og 6). Enheten er W/m\*K. Plasseringen i tabellen har ingen sammenheng her.

### 7.2.5 Høy teoretisk varmeledningsevne sett i sammenheng med en stor andel pyritt

Kaksprøve nr.21 var prøven som inneholdt mest lysreflekterende materiale, basert på visuell observasjon av kaksprøvene (se vedlegg figur B.1). Av denne grunn ble prøven valgt ut til XRD-analyse. I tillegg var den representativ for gruppe 2 (se figur 6.2). XRD-analysen viste at prøve 21 inneholdt en stor mengde pyritt, hele 21.93 %. Dette var den høyeste andelen pyritt funnet i de fem kaksprøvene. Tabell 3 under 3.3.2 viser at varmeledningsevnen til pyritt er betraktelig høyere enn for de andre mineralene. Derfor vil den teoretiske varmeledningsevnen utledet for prøve 21 ved formel 11 gi en høy varmeledningsevne. Denne varmeledningsevnen er nesten dobbelt så høy som de andre utregnede verdiene. Viktig å merke seg her at referanseverdien hentet for varmeledningsevnen til pyritt er basert på isotropisk pyritt (Clauser & Huenges, 1995). Denne høye varmeledningsevnen er dersom pyritt opptrer i sammenhengende lag, noe som ofte ikke er tilfellet ute i felt. I berggrunnen vil trolig pyritten være jevnt fordelt og dermed ikke ha den samme varmeledningsevnen. Se illustrasjon 7.2. Det var kun to kaksprøver innad i gruppe 2, noe som tyder på at dette kun er en gang som borehullet treffer. Innvirkningen dette laget har vil dermed trolig ikke være stor.



**Figur 7.2:** Illustrasjon av hvordan pyritt kan oppstå i lag (venstre) eller fordele seg jevnt i bergmassen (høyre). Hvordan pyritten er fordelt i bergmassen vil avgjøre hvor stor innvirkning det vil ha på den effektive varmeledningsevnen. Den vil altså være høyest dersom pyritten opptrer i lag.

### 7.2.6 Faktoren av størst betydning - de termiske responstestene

De termiske responstestene (se tabell 9) vil være av større betydning enn de utregnede teoretiske varmeledningsevnene (se tabell 7) i vurderingen av plasseringen av sesongvarmelageret. Som tidligere nevnt under 3.5 vil en termisk responstest gi en tydeligere indikasjon på de faktiske forholdene i felt. Det er gjort termisk responstesting i seks testbrønner som er plassert jevnt utover området som er under vurdering. De teoretiske utledede varmeledningsevnene er basert på et fåtall prøver fra kun en av testbrønnene.

### 7.2.7 Berggrunnens mekaniske påvirkning etter flere sesonger med temperatursykluser

Ved et høytemperatursesongvarmelager vil grunnen etter flere sesonger nå en temperatur på over 90 grader. Temperaturen i grunnen vil variere utifra sesongen. I denne masteroppgaven har et av formålene vært å studere om berggrunnens mekaniske styrke blir påvirket ved gjentatte oppvarmings- og avkjølningsykluser. Oppvarming av kjerneprøver ble gjennomført for å se om gjentakende temperatursykluser fra romtemperatur opp til 105 °C ville svekke eller styrke bergmassen. Som resultatene fra punktlasttestene viser (se figur 6.7), var det en forskjell i den korrigerede punktlaststyrkeindeksen mellom de varmede og de ikke-varmede kjernene. Forskjellen var ikke stor, men den var statistisk signifikant for både den diametrale og den aksiale punktlasttesten. De varmede kjernene hadde generelt en høyere korrigeret punktlaststyrkeindeks og kunne altså påføres en litt høyere last før de gikk til brudd. Boksplottet som kan ses i figur 6.7 viser at medianen til de fire ulike boksplottene er plassert relativt i midten av boksene. Dette er en god indikator på verdiene, da det er heldig at øvre 75% og nedre 25% ikke ligger langt fra medianen. Dette tyder på en liten spredning i dataene. De korrigerede punktlaststyrkeindeksene for de diametrale testene på de ikke-varmede kjernene har en ekstremverdi som havner utenfor datasettet. Denne såkalte uteliggeren er sannsynligvis en svak prøve som ikke er representativ for den normale variasjonen i bergmassen.

Mulige årsaker til denne lille økningen vil kunne forklares ved å se på tidligere studier. Som nevnt under 2.1.1 vil det være en rekke årsaker til at bergmassen kan oppleve en økning i mekanisk styrke ved oppvarming til rundt 100 °C (Wong mfl., 2020). En av de styrkende faktorene ved oppvarming i det milde temperaturområdet er lukking av preeksisterende mikrosprekker. En annen styrkende mekanisme ved oppvarming, er når mineraler utvider seg og lukker tidligere porerom (Wong mfl., 2020). Som nevnt under 2.1.5 vil en økning av porøsitet ikke være ønskelig, grunnet at bergmassens bruddstyrke minker ved kompresjon (Becattini mfl., 2017). Som nevnt under 2.1.1 vil både porøsitet og permeabiliteten til porestrukturen generelt øke ved høye temperaturer (Wong mfl., 2020). For typiske norske bergarter fra Paleozoikum og eldre er porøsiteten ansett å være svært lav. Denne mekanismen er derfor trolig ikke så viktig i Norge. Andre mekanismer som både kan ha en styrkende og svekkende effekt på bergartsstyrken ved oppvarming er dannelsen av termiske induserte mikrosprekker og vannrelaterte endringer. Disse vannrelaterte endringene opp mot rundt 100 °C vil omhandle fordamping av absorbert vann og frigjøring av bundet vann, slik som figur 2.1 viser (Wong mfl., 2020).

Som vist under 2.1.1 ved figur 2.2, vil trendene ved oppvarming variere. Noen bergartsprøver vil oppleve en økning, noen en minkning og andre holde seg relativt stabile i styrke. Det er viktig å være klar over at i Wong mfl. (2020) ble det testet på tre ulike bergarter (Indisk granitt, biotitisk gneis og khandalitt). Studiet gjort på Beishan granitt under 2.1.2 viser også til at ved oppvarming vil sprekker og porer lukkes (Wang mfl., 2023). Ved vurdering av et høytemperatur sesongvarmelageret vil resultatene fra analysen gjort i denne masteroppgaven vise til at berggrunnen vil tåle de gjentatte høye temperatursyklusene. Bergmassen vil trolig ikke svekkes, men oppleve en liten økning i styrke.

Ved testing av de varmede og ikke-varmede kjernene ble punktlasttester gjennomført. Dette er kun en av flere mulige undersøkelser som kan gjennomføres for å tallfeste styrken til bergmassen. UCS-test, Triaxial-test og Braziltest kunne også blitt gjennomført. Dersom flere metoder hadde blitt gjennomført på kjernene, vil vurderingen av styrkens utvikling være sikrere sammenlignet med kun gjennomføring av punktlasttester. Da kunne man sett styrkens utvikling ved



gjentatt oppvarming og avkjøling ved UCS-, triaxial- og braziltest. En fordel ved UCS- og Triaxial test er at den ikke gjennomføres manuelt men med en testmaskin. Dette vil gjøre usikkerhetene knyttet til ukorrekt gjennomførelse mindre. Fordelen med at alle kjerner ble benyttet for punktlasttesting er at metoden er rask og enkel slik at det ble gjennomført mange repetisjoner, som i seg selv vil gjøre resultatene sikrere.

### **7.2.8 Forholdene ute i felt sammenlignet med analysen gjennomført på laboratoriet**

Det er noen skiller mellom hvordan testen har blitt gjennomført sammenlignet med de faktiske forholdene ute i sesongvarmelageret. For det første ble kjernene i denne analysen varmet opp til 105 °C, noe som er høyere enn det den maksimale temperaturen i lageret vil være. Denne forskjellen vil trolig ikke spille en stor rolle, og i forhold til resultatene er det mer hensiktsmessig å overgå denne temperaturen. Dersom kjernene ble utsatt for en lavere temperatur enn i lageret vil ikke effekten av den høye temperaturen i lageret være sikker. Som tidligere nevnt under 2.1.1 vil berggrunnen ofte reagere mer ved økt temperaturutsettelse. I sesonglageret vil ikke temperatursyklusene gå like hyppig som de syklusene kjernene på laboratoriet har blitt utsatt for. I lageret vil en temperatursyklus vare et år, mens under denne analysen var en temperatursyklus gjennomgått på et døgn. Disse hyppige syklusene vil kunne fremprovosere en reaksjon sammenlignet med om det gikk over lengre tid. I denne sammenhengen er dette ikke nødvendigvis negativt, siden det er ønsket å detektere mulige innvirkninger på berggrunnen. Ute i felt er det ikke ønsket at berggrunnen skal bli mekanisk svakere. Derfor vil det være et enda mer positivt resultat at kjernene ikke ble mekanisk svakere ved så hyppige temperatursvingninger.

### **7.2.9 Økning i mekanisk styrke grunnet valgt testmetode**

Som nevnt under Wong mfl. (2020) er det også omdiskutert om økningen i bergartsstyrke som følge av oppvarmingen delvis er et resultat av trykkutsettelsen ved destruktiv mekanisk testing. Den initielle økningen skjer som et resultat av

den motvirkende utvidelsen av mineralene og dannelsen av mikrosprekker. Det er snakk om at den initielle økningen i styrke og den senere svekkingen blir større som følge av dette (Wong mfl., 2020). Dersom dette er tilfellet vil det kunne være mulig at testmetoden valgt ved denne analysen leder til et noe misvisende svar. Dermed vil resultatene kunne vise til en større økning i bergartsstyrken sammenlignet med det som er reelt i lageret der bergmassen ikke blir fysisk testet på. Både de oppvarmede og de ikke-oppvarmede kjernene ble utsatt for destruktiv trykkutsettelse ved gjennomføring av punktlasttestene. Den motvirkende effekten av utvidelse og mikrosprekkdannelse vil kun foregå i de oppvarmede kjernene. Selvom de oppvarmede kjernene var fullstendig avkjølt til romtemperatur før punktlasttestene, vil de 43 temperatursyklusene trolig lede til permanent deformasjon i kjernene.

#### **7.2.10 Kategorisering av kjernene basert på kvalitet - gjennomsnitt og antall ikke-godkjente**

Ved all analyse gjennomført har målet vært å minimere mulige usikkerheter. Derfor ble kjerneprøvene delt inn i tre kategorier basert på visuell observasjon. Det ble tatt en vurdering på kjernes kvaliteten med grunnlag i synlige sprekkeplan. Deretter ble de tre kategoriene (bra, ok, dårlig) fordelt likt i to grupper. Disse to gruppene består av oppvarmede kjerner og ikke-oppvarmede. En lik fordeling av kategoriene mellom de to gruppene skulle hindre at flere ”dårlige” eller ”gode” kjerner ble plassert på en testgruppe. Dersom det hadde skjedd ville det kunne lede til at en gruppe fikk misvisende høy eller lav korrigert punktlaststyrkeindeks. Denne evalueringen av om en kjerne var av ”god” eller ”dårlig” kvalitet var subjektiv. Derfor vil verdien av denne inndelingen kunne være mangelfull.

Gjennomsnittsverdiene av den korrigerte punktlaststyrkeindeksen til de tre kategoriene ble utregnet for begge gruppene (se figur 8). Resultatene viser at gjennomsnittet for kategorien ”god” er noe høyere enn kategoriene ”ok” og ”dårlig” for alle testene. Dette vil altså gjelde for diametral og aksialtest for både de varmede og de ikke-varmede kjernene. ”Ok” kategorien har også høyere gjennomsnittlig korrigert punktlaststyrkeindeks sammenlignet med kategorien ”dårlig”, med unntak

av den diametrale testen på de ikke-varmede kjernene.

Antallet ikke-godkjente er også høyt under den ”dårlige” kategorien sammenlignet med antallet kjerner (kun 3 stk). I kategorien ”god” var det 18 kjerner og dermed vil prosentandelen ikke-godkjente være lavere. Når det er nesten like mange ikke-godkjente i de to kategoriene, vil dette derfor indikere at testkvaliteten til kjernene under ”dårlig” kategorien var dårligere. Et unntak er ved den aksiale testen på de varmede kjernene, der det var 0 ikke-godkjente under de ”dårlige” kjernene. I motsetning var det her 7 ikke-godkjente under kategorien ”god”. Basert på gjennomsnittsverdiene og antallet ikke-godkjente under de tre kategoriene har inndelingen vært hensiktsmessig.

### **7.2.11 Høyere effektiv varmeledningsevne i testbrønn 3 sammenlignet med de andre seks testbrønnene**

Resultatene fra de termiske responstestene som kan ses i tabell 9 viser at den effektive varmeledningsevnen for testbrønn 3 (EB3) er betraktelig høyere enn de andre testbrønnene. Den effektive varmeledningsevnen er på 6.2 W/m\*K. Hovedårsaken til denne forhøyede verdien er det vannførende laget som er påvist i testbrønnen ved 200 meters dyp. Det vannførende laget vil føre til at den effektive varmeledningsevnen påvist i borehullet blir noe misvisende. Dette er fordi at den effektive varmeledningsevnen ikke kun betegner berggrunnens varmeledningsevne, men også mulige bidrag fra grunnvannsbevegelser (Ramstad, 2013a).

Man kan også omdiskutere andre mulige forklaringer på denne forhøyede effektive varmeledningsevnen. Som tidligere nevnt viste XRD-analyse av kaksprøve 21 en stor bestanddel pyritt. Basert på de innhentede kaksprøvene var denne kaksprøven en del av en gang som traff borehullet. Dette utgjorde gruppe 2, se figur 6.2. Selv om dette er en liten bestanddel av borehullet, vil det høye pyrittinnholdet i denne gangen kunne påvirke varmeledningsevnen i positiv retning. Både varmeledningsevnen til pyritt (se tabell 3) og den teoretiske varmeledningsevnen til kaksprøve 21 (se tabell 7) er høy. Her er det viktig å merke seg at de to kaksprøvene under denne gruppen ble hentet inn ved borstang nr. 20 og 21. Det gikk altså ikke to borstenger mellom disse

to innhentningene. Dermed vil trolig ikke mektigheten til denne gangen være veldig stor. Derfor kan det diskuteres om gangen vil kunne ha en veldig stor innvirkning på den totale effektive varmeledningsevnen til borehullet.

### 7.2.12 Oppvarmingens effekt på varmeledningsevnen

Som nevnt under tidligere studier under 2.1.4 vil varmeledningsevnen til berggrunnen påvirkes av oppvarming. Studiet C. Chen mfl. (2021) viser til at det var en korrelasjon mellom varmeledningsevnen ved romtemperatur og oppvarmingens påvirkning på den. Dersom verdiene for effektiv varmeledningsevne fra de termiske responstestene på Nyhavna skulle vist samme trend som bergartene i C. Chen mfl. (2021) vil varmeledningsevnen trolig blitt litt redusert ved oppvarming. Dette er dersom man setter de effektive varmeledningsevnene som ”varmeledningsevnen ved romtemperatur”. Det er også mulig å se på de vulkanske bergartenes utvikling i figuren fra C. Chen mfl. (2021), grunnet at grønnstein opprinnelig er en vulkansk bergart. Da vil ikke varmeledningsevnen reduseres noe ved oppvarming opp til 100 °C, den vil muligens oppleve en liten økning. Merk at dersom det hadde vært en annen dominerende bergart på Nyhavna, eksempelvis sandstein, viser trendene i figuren at det vil kunne skje en stor reduksjon i varmeledningsevnen. Da ville oppvarmingens effekt på varmeledningsevnen kanskje burde blitt studert nærmere.

Det er usikkert hvor mye effekt oppvarmingen vil ha på berggrunnens varmeledningsevne. Dersom det skulle vært tilfellet at varmeledningsevnen blir noe redusert ved oppvarming, vil det uansett ikke ha en stor innvirkning på lagerets kapasitet. De effektive varmeledningsevnene er gode og forholdene er egna for etablering.

## 7.3 3D-modell over grunnforholdene på Nyhavna i Leapfrog Geo

### 7.3.1 Representativitet og mulige bruksområder

3D-modellen laget i Leapfrog Geo gir en enkel visualisering av grunnforholdene på Nyhavna. Tolkningen av grunnforholdene har da blitt gjort på grunnlag av syv testbrønner og 18 totalsonderboringer. Modellen er et forsøk på å gjengi en forenklet versjon av virkeligheten. Som 3D-modellen viser, er grunnundersøkelsene jevnt fordelt utover området, og på denne måten minker usikkerhetene relatert til tolkningene seg.

Borehullsavvikene kommer ikke frem i modellen, hvor brønnene er angitt som vertikale nedover. Dette kan bidra til et noe feil inntrykk av testbrønnene på Nyhavna. Dette gjelder spesielt testbrønn 3 der borehullsavviket var relativt stort.

Den modellerte berg- og løsmasse kontakten i 3D-modellen vil kunne komme til nytte ved både etablering av geotermosen eller annet grunnarbeid på Nyhavna. Den vil da kunne være nyttig ved at løsmassedekket kan estimeres, og dermed vil eksempelvis antallet foringsrør kunne anslås før boringen av testbrønnen starter. Det skal merkes at det er usikkerheter relatert til denne grensen, siden den kun er basert på dataen fra testbrønnene og totalsonderboringerne. Eksempelvis går løsmassene litt opp i fjellblotningen enkelte steder (se ved A i tverrsnitt SV-NØ 6.14). Dette ble prøvd unngått ved å avgrense 3D-modellen med en ”polyline” slik at bergartsgrensen ikke skulle strekke seg opp i fjellblotningen der det ikke var samlet inn data.

### 7.3.2 Bindeledd mellom ulike fagområder og enkel visuallisering

Modelleringen av testbrønner og totalsonderboringer inn i Leapfrog visualiserte grunnforholdene på Nyhavna. Denne modellen vil være nyttig for en enkel visualisering ved involvering av folk med annen faglig bakgrunn, hvor forståelsen for konseptet vil kunne økes. Modellen vil også kunne bidra til samarbeid mellom de ulike fagdisiplinene ved benyttelse og importering av modellen. Dette vil være en

fordel både for nåværende og fremtidig arbeid. Importering av Leapfrog modellen inn i Plaxis er også mulig.

## 8 Konklusjon

Det er en rekke faktorer som har blitt studert i vurderingen av etablering av et høytemperatur sesongvarmelager på Nyhavna. Resultatene fra de termiske responstestene gjennomført i testbrønnene var den mest essensielle faktoreren i vurderingen. De termiske responstestene i seks testbrønner viste at berggrunnen var egnet i forhold til den effektive varmeledningsevnen og den termiske borehullsmotstanden. Det ble kun påvist et vannførende lag i testbrønn 3 som hadde et stort borehullsavvik. Da ved at bunnen av dette borehullet der der vannførende laget traff brønnen, er lokalisert under fjorden (se figur 7.1). Det antas at det vannførende laget kan unngås dersom borehullslageret plasseres under tørt land. Den effektive varmeledningsevnen i testbrønn 3 var spesielt høy (6.2), men dette skyldes trolig det vannførende laget.

XRD-analysen som ble gjennomført på fem utvalgte kaksprøver fra testbrønn 3, la grunnlaget for beregning av teoretisk varmeledningsevne. De teoretiske varmeledningsevnene viste at berggrunnen var egnet for etablering av et sesongvarmelager. Resultatene fra de termiske responstestene gjenspeiler de faktiske forholdene best, men disse teoretiske varmeledningsevnene kan være med på å indikere grunnforholdene.

Gjentatt oppvarming og avkjøling av kjernene bestående av grønnstein viste at temperatursyklusene ga en liten økning i bergartsstyrken. Den korrigerte punktlaststyrkeindeksen ved både diametral og aksial test hadde en signifikant høyere verdi hos kjernene som var utsatt sammenlignet med kontrollgruppen. Med grunnlag i dette vil temperaturvariasjonene i sesongvarmelageret som følge av oppladning- og uthentningsperiodene ikke påvirke berggrunnens stabilitet negativt. Det må merkes at kjernene var utsatt for 105 °C, dette vil være høyere enn berggrunnens maksimale temperatur i lageret. Berggrunnens varmeledningsevne vil kunne påvirkes av oppvarmingen som skjer i sesongvarmelageret viser tidligere studier, men vil trolig ikke ha en stor innvirkning på berggrunnens egnethet.

3D-modellen i Leapfrog Geo representerer flere av grunnundersøkelsene som er gjennomført på Nyhavna visuelt. Denne enkle visuelle representasjonen vil kunne

benyttes mellom ulike fagdisipliner og fungere som et bindeledd.

Forslag til mulig videre arbeid er:

- Videreutvikle 3D-modellen i Leapfrog Geo. Mulig å modellere inn flere fremtidige grunnundersøkelser. Også mulig å ta hensyn til borehullsavviket i testbrønnene og totalsonderboringene for å gjøre modellen så realistisk som mulig.
- Undersøke ulike testmetoder for å måle påvirkningen gjentatte temperatursykluser har på berggrunnen, spesielt ikke-destruktive testmetoder.
- Undersøke varmeledningsevnen utvikling i berggrunnen ved oppvarming. Samle inn prøver og måle varmeledningsevnen ved ulike temperaturer når laboratoriet for varmeledningsevne målinger på NGU er åpent igjen.



## Referanser

- Acuna, J. (2010). *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers* [Doktoravhandling, KTH School of Industrial Engineering og Management]. Hentet 8. januar 2024, fra <https://www.semanticscholar.org/paper/Improvements-of-U-pipe-Borehole-Heat-Exchangers-Acu%C3%B1a/9fe4de41b9f2843b37f811c48957e50475b11840>
- Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, *144*, 341–378. Hentet 19. september 2023, fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421732056X>
- Becattini, V., Motmans, T., Zappone, A., Madonna, C., Haselbacher, A., & Steinfeld, A. (2017). Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage. *Applied Energy*, *203*, 373–389. Hentet 11. desember 2023, fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917307687>
- Båsum Boring. (2012). Termisk responstest betaler seg. Hentet 26. januar 2024, fra <https://basum.no/fagomrader/energibronner/responstest/>
- Chen, C., Zhu, C., Zhang, B., Li, B. T. K., Li, W., & Fu, X. (2021). Effect of temperature on the thermal conductivity of rocks and its implication for in situ correction. *Geofluids*, *2021*, 1–12. Hentet 11. desember 2023, fra <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2021/6630236/>
- Chen, G., Li, T., Zhang, G., Yin, H., & Zhang, H. (2014). Temperature effect of rock burst for hard rock in deep-buried tunnel. *Natural hazards*, *72*, 915–926. Hentet 6. desember 2023, fra <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-014-1042-6>
- Clauser, C., & Huenges, E. (1995). Thermal Conductivity of rocks and minerals. *Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants*, *3*, 105–126. Hentet 5. januar 2024, fra <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RF003p0105>
- Dutrow, B. L., & Clark, C. M. (u.å.). X-ray Powder Diffraction (XRD). Hentet 17. januar 2024, fra [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/XRD.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html)

- Dwivedi, R., Goel, R., Prasad, V., & Sinha, A. (2008). Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. *International Journal of Rock mechanics and mining Sciences*, 45, 303–315. Hentet 6. desember 2023, fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160907000822?via%3Dihub>
- Eggebø, T. (2020). Termisk responstest Saksvik rapport. *Asplan Viak*.
- Eggebø, T., Holmberg, H., & Ramstad, R. K. (2020). Termisk responstest og dimensjonering Fosslia omsorgssenter rapport. *Asplan Viak*.
- Engvold, O. (2023). Sola. *Store norske leksikon*. Hentet 10. januar 2024, fra <https://snl.no/Sola>
- Fossen, H. (2017). Konveksjonsstrøm (geologi). *Store norske leksikon*. Hentet 10. januar 2024, fra [https://snl.no/konveksjonsstr%C3%B8m-\\_geologi](https://snl.no/konveksjonsstr%C3%B8m-_geologi)
- Franklin, J. (1985). Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22, 51–60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906285923277>
- Gehlin, S. (1998). Thermal respons test - in situ measurements of thermal properties in hard rock. *Luleå tekniska universitet*. Hentet 15. september 2023, fra <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991135/FULLTEXT01.pdf>
- Gehlin, S. (2002). *Thermal respons test: method development and evaluation* [Doktoravhandling, Luleå university of technology]. Hentet 30. januar 2024, fra <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991442/fulltext01.pdf>
- Gilde, T. (2009). Geoteknisk vurdering av utbygningsforholdene på Nyhavna. *Rambøll*. Hentet 4. januar 2024, fra [https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/byplankontoret/kommuneplan/kdp\\_nyhavna\\_k20110005/kdpl\\_nyhavna\\_off-ettersyn/vedlegg-9.-geoteknisk-rapport.pdf](https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/byplankontoret/kommuneplan/kdp_nyhavna_k20110005/kdpl_nyhavna_off-ettersyn/vedlegg-9.-geoteknisk-rapport.pdf)
- Heckman, K. (2024). Density of a cylinder. *vCalc*. Hentet 16. april 2024, fra <https://www.vcalc.com/wiki/cylinder-density>
- Helseth, L. E. (2023). Varmekapasitet. *Store Norske Leksikon*. Hentet 17. januar 2024, fra <https://snl.no/varmekapasitet>

- Henry, D., Eby, N., Goodge, J., & Mogk, D. (u.å.). X-ray reflection in accordance with Bragg's law. Hentet 17. januar 2024, fra [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/BraggsLaw.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/BraggsLaw.html)
- Hofstad, K. (2019). Grunnvarme. *Store norske leksikon*. Hentet 24. januar 2024, fra <https://snl.no/grunnvarme>
- Hofstad, K. (2023). Varmepumpe. *Store norske leksikon*. Hentet 30. januar 2024, fra <https://snl.no/varmepumpe>
- Holder, C. F., & Schaak, R. E. (2019). Tutorial on powder X-ray diffraction for characterizing nanoscale materials. *American Chemical Society Nano*, 13, 7359–7365. Hentet 16. januar 2024, fra <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.9b05157>
- Holmberg, H., & Tønnesen, J. (2019). Nettet varmeanlegg rapport. *Asplan Viak*.
- Ingeoexpert. (u.å.). Introduction to Leapfrog Geo. Hentet 28. februar 2024, fra <https://ingeoexpert.com/en/courses-online/introduction-to-leapfrog-geo/>
- Johnsen, R., & Øverby, H. (2022). Fiberoptikk. *Store norske leksikon*. Hentet 30. januar 2024, fra <https://snl.no/fiberoptikk>
- Liebel, H. T. (2012). *Influence of groundwater on measurements of thermal properties in fractured aquifers* [Doktoravhandling, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet]. Hentet 15. september 2023, fra <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/236006>
- Malmberg, M., Lindståhl, H., Mazzotti, W., Lazzarotto, A., & Acuna, J. (2018). High temperature borehole thermal energy storage - a case study. *IGSHPA Research Track*. Hentet 4. april 2024, fra [https://shareok.org/bitstream/handle/11244/301575/oksd\\_ighspa\\_2018\\_malmberg.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://shareok.org/bitstream/handle/11244/301575/oksd_ighspa_2018_malmberg.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Malvern Panalytical. (u.å.). X-ray Diffraction (XRD). Hentet 15. januar 2024, fra <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction>
- Micro Photonics Inc. (u.å.). What is Micro-CT? An introduction. Hentet 5. desember 2023, fra <https://www.microphotonics.com/what-is-micro-ct-an-introduction/>
- Miskovsky, K., & Saiang, C. (2012). Effect of heat on the mechanical properties of selected rock types - A laboratory study. *Harmonising Rock engineering and the environment*, 815–820. Hentet 15. mars 2024, fra <https://www.researchgate.net/publication/260211110>

- te.net/publication/282725830\_Effect\_of\_heat\_on\_the\_mechanical\_properties\_of\_selected\_rock\_types\_-\_A\_laboratory\_study
- Mørkved, A., & Holmberg, H. (2016). Otto Nielsens vei 12 - Analyse av termisk responstest og dimensjonering av grunnvarmeanlegg rapport. *Asplan Viak*.
- Nordell, B. (1994). *Borehole heat store design optimization* [Doktoravhandling, Luleå University of Technology]. Hentet 5. april 2024, fra <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A999609&dswid=6973>
- Nordell, B., Andersson, O., Rydell, L., & Scorpo, A. L. (2015). Long-term Performance of the HT-BTES in Emmaboda, Sweden. Hentet 4. april 2024, fra [https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1005848/FULLTEXT01.pdf%20\(DL%202018-05-07\)](https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1005848/FULLTEXT01.pdf%20(DL%202018-05-07))
- Nordlund, E., Zhang, P., Dineva, S., Saiang, C., & Mainali, G. (2014). Impact of fire on the stability of hard rock runnels in sweden. *Stiftelsen bergteknisk forskning, 136*. Hentet 15. mars 2024, fra [https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/443/BeFo\\_Rapport\\_136\\_skyddad.pdf](https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/443/BeFo_Rapport_136_skyddad.pdf)
- Norges geologiske undersøkelse. (u.å.-a). Berggrunnskart - NGU kartserver. [https://geo.ngu.no/kart/berggrunn\\_mobil/](https://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/)
- Norges geologiske undersøkelse. (u.å.-b). Lukkede systemer. Hentet 24. januar 2024, fra <https://www.ngu.no/geologiske-ressurser/lukkede-systemer>
- Norges geologiske undersøkelse. (u.å.-c). Løsmassekart - NGU kartserver. [https://geo.ngu.no/kart/losmasse\\_mobil/](https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/)
- Norges geologiske undersøkelse. (u.å.-d). NADAG - Nasjonal database for grunnundersøkelser. Hentet 2. januar 2024, fra [https://geo.ngu.no/kart/nadag\\_mobil/](https://geo.ngu.no/kart/nadag_mobil/)
- Norges geologiske undersøkelse. (u.å.-e). Åpne systemer. Hentet 25. januar 2024, fra <https://www.ngu.no/geologiske-ressurser/apne-systemer>
- Nyhavna. (u.å.). Historiske Nyhavna. Hentet 26. september 2023, fra <https://nyhavna.no/om-oss/historien/>
- Ormestad, H., Pedersen, B., & Helseth, L. E. (2022). Varmeledning. *Store Norske Leksikon*. Hentet 10. januar 2024, fra <https://snl.no/varmeledning>
- Palacios, A., Cong, L., Navarro, M., Ding, Y., & Barreneche, C. (2019). Thermal conductivity measurement techniques for charecterizing thermal energy

- storage materials - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 32–52. Hentet 12. september 2023, fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301625?via%3Dihub>
- Pedersen, B. (2018). Konveksjon (fysikk). *Store Norske Leksikon*. Hentet 10. januar 2024, fra [https://snl.no/konveksjon\\_-\\_fysikk](https://snl.no/konveksjon_-_fysikk)
- Pedersen, B. (2021). Varmestråling. *Store Norske Leksikon*. Hentet 10. januar 2024, fra <https://snl.no/varmestr%C3%A5ling>
- Pedersen, B. (2023). Varme. *Store Norske Leksikon*. Hentet 10. januar 2024, fra <https://snl.no/varme>
- Physical Acoustics. (u.å.). Acoustic Emission (AE) Technology. Hentet 5. desember 2023, fra <https://www.physicalacoustics.com/ae-technology/>
- Ramstad, R. K. (2011). Grunnvarme i Norge - kartlegging av økonomisk potensial. Hentet 19. september 2023, fra [https://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2011/oppdragsrapportA2011\\_05.pdf](https://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2011/oppdragsrapportA2011_05.pdf)
- Ramstad, R. K. (2013a). Resultater fra termisk responstest og dimensjonering av energibrønner. *Asplan Viak*. Hentet 13. desember 2023, fra <https://www.mercell.com/nb-no/m/file/getfile.ashx?id=40328878>
- Ramstad, R. K. (2013b). Resultater fra termisk responstest og dimensjonering av energibrønner Solbakken skole. *Asplan Viak*. Hentet 26. februar 2024, fra <https://www.mercell.com/nb-no/m/file/getfile.ashx?id=40328877>
- Ramstad, R. K. (2013c). Termisk responstest og dimensjonering Hommelvik rapport. *Asplan Viak*.
- Ramstad, R. K., & Holmberg, H. (2020). Rapport termiske responstester Nyhavna grunnvarme. *Asplan Viak*.
- Ramstad, R. K., & Holmberg, H. Grunnvarme og høytemperatur borehullsbasert sesongvarmelagring - Geotermosløsninger og energiplanlegging. I: 2022.
- Ramstad, R. K., Holmberg, H., & Eggebø, T. (2020). Prosjekteringsrapport grunnvarme Moholt allé 9. *Asplan Viak*.
- Ramstad, R. K., Holmberg, H., Fossbakken, M., Bugge, L., Engedahl, E., Hanstad, N., & Landberg, F. (2021). Sluttrapport Enova. Hentet 4. april 2024, fra <https://d33by0imu011lz.cloudfront.net/1632137346/sluttrapport-konseptutredning-kolbotn-il.pdf>

- Ramstad, R. K., Holmberg, H., & Syljuåsen, M. (2021). Konseptutredning Nardovegen 12-14 - delrapport termisk energi. *Asplan Viak*.
- Retsch. (u.å.). XRD-MILL McCrone. <https://www.retsch.com/products/milling/ball-mills/mccrone-xrd-mill/>
- Riise, M. H. (2019). Termisk responstest og dimensjonering - Hegra barneskole rapport. *Asplan Viak*.
- Riise, M. H., & Ramstad, R. K. (2016). Heimdal vgs- analyse av responstest og dimensjonering av energibrønner rapport. *Asplan Viak*.
- Romstad, M. M. (2024). Rapport Nyhavna varmelager. *Multiconsult*.
- Rosvold, K. A. (2022). Nyhavna. *Store norske leksikon*. Hentet 26. september 2023, fra <https://snl.no/Nyhavna>
- Rui, I. J. (2024). Fyrsetting. *Store norske leksikon*. Hentet 30. januar 2024, fra <https://snl.no/fyrsetting>
- Runden, S. H. (2020). Historiske hendelser gjennom 100 år på nyhavna. Hentet 26. september 2023, fra <https://trondheim2030.no/2020/11/23/historiske-hendelser-gjennom-100-ar-pa-nyhavna/>
- Seequent. (u.å.-a). Leapfrog Geo. Hentet 28. februar 2024, fra <https://www.esri.com/partners/seequent-ltd-a2T70000000TNSiEAO/leapfrog-geo-a2d5x000005JhDDAA0>
- Seequent. (u.å.-b). Spend time on geology, not data. Hentet 28. februar 2024, fra <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/>
- Statens Vegvesen. (2021). Feltundersøkelser Håndbok R211. <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/r211-feltundersokelser-2021.pdf>
- Strålberg, J., & Hartvigsen, S. (2022). *Geologiske forutsetninger for uttak av grunnvarme i Trondheimsområdet* [Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet]. Hentet 17. april 2024, fra <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3005948>
- Sundberg, J. (1988). Thermal properties of soils and rocks. *Swedish Geotechnical Institute Linköping, Sweden*. Hentet 26. januar 2024, fra [https://www.researchgate.net/publication/35391832\\_Thermal\\_properties\\_of\\_soils\\_and\\_rocks](https://www.researchgate.net/publication/35391832_Thermal_properties_of_soils_and_rocks)

- Sundberg, J. (1991). Termiske egenskaper i jord og berg. *Statens Geotekniska institut*. Hentet 5. januar 2024, fra <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i12.pdf>
- Varmepumpeforeningen. (2023). Væske-til-vann-varmepumpe. Hentet 29. januar 2024, fra <https://www.varmepumpeinfo.no/varmepumpetyper/vaske-til-vann-varmepumpe>
- Varmepumpeforeningen. (2024). Energibrønn. Hentet 12. april 2024, fra <https://www.varmepumpeinfo.no/energikilder-for-varmepumper/energibrønn>
- Vishal, V., Pradhan, S., & Singh, T. (2011). Tensile strength of rock under elevated temperatures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 1127–1133. Hentet 6. desember 2023, fra <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-011-9440-y>
- Wang, G., Chen, S., & Zheng, K. (2023). Experimental study on mechanical properties of Beishan granite in the mild temperature range. *Case studies in Thermal Engineering*, 52. Hentet 13. desember 2023, fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X23009917>
- Waragai, T. (2023). Influence of thermal cycling in the mild temperature range on the physical properties of cultural stones. *Journal of Cultural Heritage*, 59, 171–180. Hentet 14. desember 2023, fra [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S129620742200214X?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=8355180e0b8356ae](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S129620742200214X?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8355180e0b8356ae)
- Wong, L. N. Y., Zhang, Y., & Wu, Z. (2020). Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range. *Engineering Geology*, 272. Hentet 5. desember 2023, fra <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795219323051>

# Appendix

## 1 Vedlegg

### A Punktlasttestene



Nummer	D (mm)	P (kN)	Korrigert P (kN)	$De^2$ (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	Is	F	Is (50)	Kommentar
1V-G	39.69	9.84	9.45	1575.30	39.69	6.00	0.90	5.40	
1V-G	39.69	5.64	5.41	1575.30	39.69	3.44	0.90	3.10	
1V-G	39.69	6.78	6.51	1575.30	39.69	4.13	0.90	3.72	
2V-G	39.71	7.94	7.62	1576.88	39.71	4.83	0.90	4.36	
2V-G	39.71	7.10	6.82	1576.88	39.71	4.32	0.90	3.90	
3V-G	39.70	7.68	7.37	1576.09	39.70	4.68	0.90	4.22	
3V-G	39.70	8.64	8.29	1576.09	39.70	5.26	0.90	4.74	
4V-G	39.70	7.92	7.60	1576.09	39.70	4.82	0.90	4.35	
4V-G	39.70	9.10	8.74	1576.09	39.70	5.54	0.90	5.00	
5V-G	39.72	7.60	7.30	1577.68	39.72	4.62	0.90	4.17	
5V-G	39.72	8.40	8.06	1577.68	39.72	5.11	0.90	4.61	
6V-G	39.72	8.00	7.68	1577.68	39.72	4.87	0.90	4.39	
6V-G	39.72	8.92	8.56	1577.68	39.72	5.43	0.90	4.89	
7V-G	39.69	7.90	7.58	1575.30	39.69	4.81	0.90	4.34	Ikke godkjent
7V-G	39.69	7.10	6.82	1575.30	39.69	4.33	0.90	3.90	
8V-G	39.71	8.02	7.70	1576.88	39.71	4.88	0.90	4.40	Ikke godkjent
8V-G	39.71	6.56	6.30	1576.88	39.71	3.99	0.90	3.60	
9V-G	39.70	10.96	10.52	1576.09	39.70	6.68	0.90	6.02	
9V-G	39.70	8.62	8.28	1576.09	39.70	5.25	0.90	4.73	
10V-G	39.72	9.62	9.24	1577.68	39.72	5.85	0.90	5.28	
10V-G	39.72	7.26	6.97	1577.68	39.72	4.42	0.90	3.98	
11V-G	39.71	8.44	8.10	1576.88	39.71	5.14	0.90	4.63	
12V-G	39.70	9.10	8.74	1576.09	39.70	5.54	0.90	5.00	
13V-G	39.70	7.52	7.22	1576.09	39.70	4.58	0.90	4.13	
14V-G	39.69	8.96	8.60	1575.30	39.69	5.46	0.90	4.92	
15V-G	39.71	9.82	9.43	1576.88	39.71	5.98	0.90	5.39	
16V-G	39.69	8.16	7.83	1575.30	39.69	4.97	0.90	4.48	Ikke godkjent
17V-G	39.70	8.72	8.37	1576.09	39.70	5.31	0.90	4.79	
18V-G	-	-	-	-	-	-	-	-	For kort, aksiel isteden
19V-O	39.70	8.40	8.06	1576.09	39.70	5.12	0.90	4.61	
19V-O	39.70	7.84	7.53	1576.09	39.70	4.78	0.90	4.30	
19V-O	39.70	8.70	8.35	1576.09	39.70	5.30	0.90	4.78	
20V-O	39.71	9.60	9.22	1576.88	39.71	5.84	0.90	5.27	
20V-O	39.71	9.60	9.22	1576.88	39.71	5.84	0.90	5.27	
21V-O	39.71	7.96	7.64	1576.88	39.71	4.85	0.90	4.37	
21V-O	39.71	8.68	8.33	1576.88	39.71	5.28	0.90	4.76	
22V-O	39.71	7.26	6.97	1576.88	39.71	4.42	0.90	3.98	
23V-O	39.71	8.68	8.33	1576.88	39.71	5.28	0.90	4.76	
23V-O	39.71	6.84	6.57	1576.88	39.71	4.16	0.90	3.75	Ikke godkjent
24V-O	39.69	7.32	7.03	1575.30	39.69	4.46	0.90	4.02	
24V-O	39.69	7.80	7.49	1575.30	39.69	4.75	0.90	4.28	
25V-O	39.72	7.30	7.01	1577.68	39.72	4.44	0.90	4.00	
25V-O	39.72	8.08	7.76	1577.68	39.72	4.92	0.90	4.43	
26V-D	39.71	8.80	8.45	1576.88	39.71	5.36	0.90	4.83	Ikke godkjent
26V-D	39.71	5.38	5.16	1576.88	39.71	3.28	0.90	2.95	Ikke godkjent
27V-D	39.70	7.98	7.66	1576.09	39.70	4.86	0.90	4.38	
27V-D	39.70	5.52	5.30	1576.09	39.70	3.36	0.90	3.03	Ikke godkjent
28V-D	39.72	10.44	10.02	1577.68	39.72	6.35	0.90	5.73	

**Tabell A.1:** Tabell over punktlasttest resultatene: Diametral test på oppvarmede kjerner.

Nummer	W (mm)	D (mm)	P (kN)	Korrigert P (kN)	$De^2$ (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	Is	F	Is (50)	Kommentar
1V-G	39.70	35.31	10.44	10.02	1785.74	42.26	5.61	0.93	5.20	Ikke godkjent
19V-O	39.72	27.32	13.44	12.90	1382.36	37.18	9.33	0.88	8.17	
19V-O	39.69	25.41	11.70	11.23	1284.74	35.84	8.74	0.86	7.53	
19V-O	39.72	21.96	8.04	7.72	1111.15	33.33	6.95	0.83	5.79	
19V-O	39.71	29.07	12.22	11.73	1470.53	38.35	7.98	0.89	7.08	
20V-O	39.69	30.35	13.18	12.65	1534.51	39.17	8.25	0.90	7.39	
20V-O	39.72	Avskallet bit	8.64	8.29	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
20V-O	39.69	33.44	17.56	16.86	1690.74	41.12	9.97	0.92	9.13	
21V-O	39.70	30.27	11.42	10.96	1530.85	39.13	7.16	0.90	6.41	
21V-O	39.70	34.10	9.74	9.35	1724.55	41.53	5.42	0.92	4.99	
21V-O	39.70	Avskallet bit	11.88	11.40	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
22V-O	39.70	31.48	13.30	12.77	1592.05	39.90	8.02	0.90	7.25	
22V-O	39.71	31.08	12.34	11.85	1572.21	39.65	7.53	0.90	6.79	
23V-O	39.70	34.72	16.32	15.67	1755.90	41.90	8.92	0.92	8.24	
24V-O	39.71	26.99	11.52	11.06	1365.32	36.95	8.10	0.87	7.07	
24V-O	39.71	28.18	13.42	12.88	1425.51	37.76	9.04	0.88	7.96	
24V-O	39.71	29.01	9.26	8.89	1467.50	38.31	6.06	0.89	5.37	
25V-O	39.69	35.64	13.42	12.88	1801.98	42.45	7.15	0.93	6.64	
26V-D	39.71	19.45	7.20	6.91	983.90	31.37	7.03	0.81	5.70	
27V-D	39.70	30.03	10.60	10.18	1518.71	38.97	6.70	0.89	5.99	
28V-D	39.70	31.54	12.98	12.46	1595.08	39.94	7.81	0.90	7.06	
28V-D	39.70	33.75	14.50	13.92	1706.85	41.31	8.16	0.92	7.48	
13V-G	39.71	32.06	11.70	11.23	1621.79	40.27	6.93	0.91	6.28	
13V-G	39.71	34.11	13.40	12.86	1725.49	41.54	7.46	0.92	6.86	
14V-G	39.70	30.90	11.96	11.48	1562.71	39.53	7.35	0.90	6.61	
14V-G	39.69	29.71	12.36	11.87	1502.15	38.76	7.90	0.89	7.04	
15V-G	39.71	29.76	13.06	12.54	1505.44	38.80	8.33	0.89	7.43	
15V-G	39.71	Avskallet bit	12.70	12.19	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
16V-G	39.71	24.66	9.46	9.08	1247.45	35.32	7.28	0.86	6.23	
17V-G	39.69	26.13	11.84	11.37	1321.15	36.35	8.60	0.87	7.45	
17V-G	39.71	23.77	11.06	10.62	1202.43	34.68	8.83	0.85	7.49	
7V-G	39.72	24.02	9.36	8.99	1215.38	34.86	7.39	0.85	6.29	
7V-G	39.71	27.08	11.94	11.46	1369.87	37.01	8.37	0.87	7.31	
7V-G	39.71	28.70	13.96	13.40	1451.82	38.10	9.23	0.88	8.17	
8V-G	39.72	27.45	13.96	13.40	1388.94	37.27	9.65	0.88	8.45	
8V-G	39.70	24.70	9.14	8.77	1249.16	35.34	7.02	0.86	6.01	
8V-G	39.72	25.86	9.46	9.08	1308.48	36.17	6.94	0.86	6.00	
9V-G	39.69	25.31	12.54	12.04	1279.69	35.77	9.41	0.86	8.09	Ikke godkjent
9V-G	39.71	Ikke igjennom	12.70	12.19	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
9V-G	39.71	24.22	11.32	10.87	1225.19	35.00	8.87	0.85	7.55	
10V-G	39.72	24.62	10.12	9.72	1245.74	35.30	7.80	0.85	6.67	
10V-G	39.72	Avskallet bit	6.84	6.57	-	-	-	-	-	Ikke godkjent

Tabell A.2: Tabell 1 over punktlasttest resultatene: Aksial test på oppvarmede kjerner.

Nummer	W (mm)	D (mm)	P (kN)	Korrigert P (kN)	$De^2$ (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	Is	F	Is (50)	Kommentar
10V-G	39.69	20.76	8.84	8.49	1049.64	32.40	8.09	0.82	6.65	
11V-G	39.71	32.15	7.06	6.78	1626.34	40.33	4.17	0.91	3.78	
11V-G	39.71	Avskallet bit	8.78	8.43	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
12V-G	39.72	Avskallet bit	9.32	8.95	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
1V-G	39.71	27.17	9.46	9.08	1374.42	37.07	6.61	0.87	5.78	
2V-G	39.70	29.15	9.48	9.10	1474.21	38.40	6.17	0.89	5.48	
2V-G	39.70	29.42	12.48	11.98	1487.86	38.57	8.05	0.89	7.16	
3V-G	39.69	26.33	14.00	13.44	1331.26	36.49	10.10	0.87	8.76	
3V-G	39.72	30.50	13.10	12.58	1543.26	39.28	8.15	0.90	7.31	
3V-G	39.70	30.94	16.10	15.46	1564.74	39.56	9.88	0.90	8.89	
4V-G	39.72	26.47	12.76	12.25	1339.35	36.60	9.15	0.87	7.95	
4V-G	39.72	28.46	13.20	12.67	1440.04	37.95	8.80	0.88	7.77	
4V-G	39.70	26.91	10.98	10.54	1360.93	36.89	7.75	0.87	6.75	
5V-G	39.72	29.12	15.30	14.69	1473.43	38.39	9.97	0.89	8.85	
5V-G	39.69	28.68	13.54	13.00	1450.08	38.08	8.96	0.88	7.93	
5V-G	39.70	30.57	13.74	13.19	1546.02	39.32	8.53	0.90	7.66	
6V-G	39.72	27.09	10.66	10.23	1370.72	37.02	7.47	0.87	6.52	
6V-G	39.69	27.08	11.34	10.89	1369.18	37.00	7.95	0.87	6.94	
6V-G	39.72	25.79	12.90	12.38	1304.94	36.12	9.49	0.86	8.20	
1V-G	39.70	19.68	9.00	8.64	995.28	31.55	8.68	0.81	7.06	
26V-D	39.71	22.35	7.62	7.32	1130.60	33.62	6.47	0.84	5.41	
27V-D	39.70	19.06	5.84	5.61	963.93	31.05	5.82	0.81	4.69	
18V-G	39.69	18.08	6.62	6.36	914.13	30.23	6.95	0.80	5.54	
18V-G	39.69	22.31	9.46	9.08	1128.00	33.59	8.05	0.84	6.73	
1V-G	39.70	15.57	5.42	5.20	787.43	28.06	6.61	0.77	5.10	
12V-G	39.72	21.20	9.10	8.74	1072.69	32.75	8.14	0.83	6.73	
26V-D	39.71	16.52	5.18	4.97	835.68	28.91	5.95	0.78	4.65	
23V-O	39.70	25.55	11.68	11.21	1292.15	35.95	8.68	0.86	7.48	
25V-O	39.69	15.52	6.14	5.89	784.70	28.01	7.51	0.77	5.79	
27V-D	39.70	16.03	6.74	6.47	810.69	28.47	7.98	0.78	6.19	
12V-G	39.72	16.46	5.94	5.70	832.86	28.86	6.85	0.78	5.35	
25V-O	39.69	21.97	8.40	8.06	1110.81	33.33	7.26	0.83	6.05	
16V-G	39.71	23.78	9.10	8.74	1202.93	34.68	7.26	0.85	6.16	

**Tabell A.3:** Tabell 2 over punktlasttest resultatene: Aksial test på oppvarmede kjerner.

Nummer	D (mm)	P (kN)	Korrigert P (kN)	$De^2$ (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	Is	F	Is (50)	Kommentar
1X-G	39.70	7.24	6.95	1576.09	39.70	4.41	0.90	3.98	
1X-G	39.70	7.68	7.37	1576.09	39.70	4.68	0.90	4.22	
1X-G	39.70	6.30	6.05	1576.09	39.70	3.84	0.90	3.46	Ikke godkjent
1X-G	39.70	8.34	8.01	1576.09	39.70	5.08	0.90	4.58	
2X-G	39.71	8.92	8.56	1576.88	39.71	5.43	0.90	4.90	
2X-G	39.71	6.70	6.43	1576.88	39.71	4.08	0.90	3.68	
3X-G	39.72	8.74	8.39	1577.68	39.72	5.32	0.90	4.79	
3X-G	39.72	7.52	7.22	1577.68	39.72	4.58	0.90	4.13	
4X-G	39.69	8.28	7.95	1575.30	39.69	5.05	0.90	4.55	
4X-G	39.69	7.18	6.89	1575.30	39.69	4.38	0.90	3.94	
5X-G	39.71	8.14	7.81	1576.88	39.71	4.96	0.90	4.47	
5X-G	39.71	6.34	6.09	1576.88	39.71	3.86	0.90	3.48	
6X-G	39.69	7.52	7.22	1575.30	39.69	4.58	0.90	4.13	
6X-G	39.69	7.46	7.16	1575.30	39.69	4.55	0.90	4.10	
7X-G	39.72	6.70	6.43	1577.68	39.72	4.08	0.90	3.68	
7X-G	39.72	3.80	3.65	1577.68	39.72	2.31	0.90	2.08	
8X-G	39.70	4.62	4.44	1576.09	39.70	2.81	0.90	2.54	
8X-G	39.70	6.98	6.70	1576.09	39.70	4.25	0.90	3.83	
9X-G	39.71	7.96	7.64	1576.88	39.71	4.85	0.90	4.37	
9X-G	39.71	7.54	7.24	1576.88	39.71	4.59	0.90	4.14	
10X-G	39.72	8.08	7.76	1577.68	39.72	4.92	0.90	4.43	
11X-G	39.72	6.74	6.47	1577.68	39.72	4.10	0.90	3.70	
12X-G	39.71	7.80	7.49	1576.88	39.71	4.75	0.90	4.28	
13X-G	39.70	8.22	7.89	1576.09	39.70	5.01	0.90	4.51	
14X-G	39.70	9.12	8.76	1576.09	39.70	5.56	0.90	5.01	
15X-G	39.71	8.60	8.26	1576.88	39.71	5.24	0.90	4.72	
16X-G	39.71	7.50	7.20	1576.88	39.71	4.57	0.90	4.12	
17X-G	39.72	8.56	8.22	1577.68	39.72	5.21	0.90	4.70	
19X-O	39.69	5.16	4.95	1575.30	39.69	3.14	0.90	2.83	
19X-O	39.69	7.76	7.45	1575.30	39.69	4.73	0.90	4.26	
20X-O	39.70	7.10	6.82	1576.09	39.70	4.32	0.90	3.90	
20X-O	39.70	6.42	6.16	1576.09	39.70	3.91	0.90	3.52	
21X-O	39.69	5.62	5.40	1575.30	39.69	3.42	0.90	3.09	
21X-O	39.69	7.94	7.62	1575.30	39.69	4.84	0.90	4.36	
22X-O	39.71	7.88	7.56	1576.88	39.71	4.80	0.90	4.32	
22X-O	39.71	6.88	6.60	1576.88	39.71	4.19	0.90	3.78	Ikke godkjent
23X-O	39.69	7.50	7.20	1575.30	39.69	4.57	0.90	4.12	
24X-O	39.71	9.74	9.35	1576.88	39.71	5.93	0.90	5.35	
25X-O	39.71	7.10	6.82	1576.88	39.71	4.32	0.90	3.90	
25X-O	39.71	7.48	7.18	1576.88	39.71	4.55	0.90	4.11	
25X-O	39.71	9.08	8.72	1576.88	39.71	5.53	0.90	4.98	
26X-D	39.69	7.48	7.18	1575.30	39.69	4.56	0.90	4.11	
26X-D	39.69	7.48	7.18	1575.30	39.69	4.56	0.90	4.11	
26X-D	39.69	2.48	2.38	1575.30	39.69	1.51	0.90	1.36	Ikke godkjent
26X-D	39.69	6.82	6.55	1575.30	39.69	4.16	0.90	3.75	
26X-D	39.69	6.70	6.43	1575.30	39.69	4.08	0.90	3.68	Ikke godkjent
27X-D	39.72	7.36	7.07	1577.68	39.72	4.48	0.90	4.04	

Tabell A.4: Tabell over punktlasttest resultatene: Diametral test på ikke-opvarmede kjerner.

Nummer	W (mm)	D (mm)	P (kN)	Korrigert P (kN)	$De^2$ (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	Is	F	Is (50)	Kommentar
1X-G	39.72	28.36	10.36	9.95	1434.98	37.88	6.93	0.88	6.12	
1X-G	39.72	31.83	10.28	9.87	1610.56	40.13	6.13	0.91	5.55	
1X-G	39.72	29.64	12.86	12.35	1499.75	38.73	8.23	0.89	7.34	
2X-G	39.71	25.25	12.86	12.35	1277.30	35.74	9.67	0.86	8.31	
2X-G	39.71	30.22	13.40	12.86	1528.71	39.10	8.41	0.90	7.53	
2X-G	39.71	34.26	12.36	11.87	1733.08	41.63	6.85	0.92	6.30	
3X-G	39.71	25.85	11.50	11.04	1307.65	36.16	8.44	0.86	7.30	
3X-G	39.71	28.50	7.46	7.16	1441.70	37.97	4.97	0.88	4.39	
3X-G	39.71	32.61	10.60	10.18	1649.61	40.62	6.17	0.91	5.62	
4X-G	39.71	23.43	8.32	7.99	1185.23	34.43	6.74	0.85	5.70	
4X-G	39.71	27.74	11.58	11.12	1403.26	37.46	7.92	0.88	6.96	
4X-G	39.71	Avskallet bit	11.06	10.62	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
5X-G	39.70	25.03	9.10	8.74	1265.85	35.58	6.90	0.86	5.92	
5X-G	39.70	28.50	13.12	12.60	1441.34	37.96	8.74	0.88	7.72	
6X-G	39.72	26.97	10.70	10.27	1364.65	36.94	7.53	0.87	6.57	
6X-G	39.72	27.33	11.42	10.96	1382.86	37.19	7.93	0.88	6.94	
6X-G	39.72	27.09	9.96	9.56	1370.72	37.02	6.98	0.87	6.09	
7X-G	39.71	29.90	10.72	10.29	1512.52	38.89	6.80	0.89	6.08	
7X-G	39.71	22.43	10.06	9.66	1134.64	33.68	8.51	0.84	7.13	
7X-G	39.71	26.20	9.00	8.64	1325.35	36.41	6.52	0.87	5.65	
8X-G	39.71	23.60	7.02	6.74	1193.83	34.55	5.65	0.85	4.78	
8X-G	39.71	26.45	9.82	9.43	1338.00	36.58	7.05	0.87	6.12	
8X-G	39.71	27.66	11.76	11.29	1399.21	37.41	8.07	0.88	7.08	
9X-G	39.69	27.03	9.66	9.27	1366.65	36.97	6.79	0.87	5.92	
9X-G	39.69	24.81	9.72	9.33	1254.41	35.42	7.44	0.86	6.37	
9X-G	39.69	28.93	8.30	7.97	1462.72	38.25	5.45	0.89	4.83	Ikke godkjent
10X-G	39.70	23.18	8.94	8.58	1172.29	34.24	7.32	0.84	6.17	
11X-G	39.72	28.84	10.88	10.44	1459.27	38.20	7.16	0.89	6.34	
12X-G	39.72	29.88	11.02	10.58	1511.89	38.88	7.00	0.89	6.25	
12X-G	39.72	31.27	12.54	12.04	1582.22	39.78	7.61	0.90	6.86	
13X-G	39.69	28.14	11.74	11.27	1422.77	37.72	7.92	0.88	6.98	
13X-G	39.69	35.54	12.56	12.06	1796.92	42.39	6.71	0.93	6.23	
14X-G	39.72	30.53	11.96	11.48	1544.78	39.30	7.43	0.90	6.67	
14X-G	39.72	30.22	12.96	12.44	1529.09	39.10	8.14	0.90	7.28	
15X-G	39.72	28.81	10.20	9.79	1457.75	38.18	6.72	0.89	5.95	
15X-G	39.72	30.60	12.30	11.81	1548.32	39.35	7.63	0.90	6.85	
16X-G	39.71	26.43	9.56	9.18	1336.99	36.56	6.86	0.87	5.96	
16X-G	39.71	28.65	13.00	12.48	1449.29	38.07	8.61	0.88	7.62	
17X-G	39.70	22.70	10.76	10.33	1148.01	33.88	9.00	0.84	7.55	
17X-G	39.70	31.15	13.94	13.38	1575.36	39.69	8.49	0.90	7.66	
18X-G	39.71	26.24	10.20	9.79	1327.38	36.43	7.38	0.87	6.40	

**Tabell A.5:** Tabell 1 over punktlasttest resultatene: Aksial test på ikke-oppvarmede kjerner.

Nummer	W (mm)	D (mm)	P (kN)	Korrigert P (kN)	$De^2$ (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	Is	F	Is (50)	Kommentar
19X-O	39.69	Avskallet bit	7.88	7.56	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
19X-O	39.69	27.15	8.94	8.58	1372.72	37.05	6.25	0.87	5.46	
19X-O	39.69	32.86	10.90	10.46	1661.42	40.76	6.30	0.91	5.74	
20X-O	39.69	Avskallet bit	3.80	3.65	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
20X-O	39.69	25.52	9.72	9.33	1290.30	35.92	7.23	0.86	6.23	
20X-O	39.69	23.56	9.28	8.91	1191.21	34.51	7.48	0.85	6.33	
21X-O	39.70	25.77	11.22	10.77	1303.27	36.10	8.26	0.86	7.14	
21X-O	39.70	23.09	7.28	6.99	1167.74	34.17	5.98	0.84	5.04	
21X-O	39.70	26.02	9.32	8.95	1315.92	36.28	6.80	0.87	5.89	Ikke godkjent
22X-O	39.71	24.09	9.24	8.87	1218.62	34.91	7.28	0.85	6.19	
22X-O	39.71	24.15	8.24	7.91	1221.65	34.95	6.48	0.85	5.51	
22X-O	39.71	33.41	12.60	12.10	1690.08	41.11	7.16	0.92	6.55	
23X-O	39.69	30.75	13.40	12.86	1554.74	39.43	8.27	0.90	7.44	
23X-O	39.69	32.37	9.50	9.12	1636.64	40.46	5.57	0.91	5.07	
24X-O	39.69	Avskallet bit	13.16	12.63	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
25X-O	39.71	24.69	8.48	8.14	1248.97	35.34	6.52	0.86	5.58	
25X-O	39.71	27.94	9.40	9.02	1413.37	37.59	6.38	0.88	5.62	
25X-O	39.71	30.17	11.46	11.00	1526.18	39.07	7.21	0.89	6.45	
26X-D	39.70	15.57	5.00	4.80	787.43	28.06	6.10	0.77	4.70	
26X-D	39.70	26.58	10.80	10.37	1344.24	36.66	7.71	0.87	6.71	
26X-D	39.70	24.37	9.38	9.00	1232.47	35.11	7.31	0.85	6.23	
26X-D	39.70	31.13	10.42	10.00	1574.35	39.68	6.35	0.90	5.73	
26X-D	39.70	28.96	11.18	10.73	1464.60	38.27	7.33	0.89	6.50	
27X-D	39.70	28.12	10.48	10.06	1422.12	37.71	7.07	0.88	6.23	Ikke godkjent
28X-D	39.70	22.85	8.40	8.06	1155.60	33.99	6.98	0.84	5.87	
27X-D	39.70	17.29	6.64	6.37	874.41	29.57	7.29	0.79	5.76	
27X-D	39.70	18.00	6.22	5.97	910.32	30.17	6.56	0.80	5.23	
24X-O	39.69	Avskallet bit	5.68	5.45	-	-	-	-	-	Ikke godkjent
24X-O	39.69	17.07	8.34	8.01	863.07	29.38	9.28	0.79	7.30	
1X-G	39.72	23.74	8.54	8.20	1201.21	34.66	6.83	0.85	5.79	
1X-G	39.72	23.95	9.00	8.64	1211.84	34.81	7.13	0.85	6.06	
10X-G	39.70	23.59	9.26	8.89	1193.02	34.54	7.45	0.85	6.31	
25X-O	39.71	27.60	12.88	12.36	1396.17	37.37	8.86	0.88	7.77	

**Tabell A.6:** Tabell 2 over punktlasttest resultatene: Aksial test på ikke-oppvarmede kjerner.

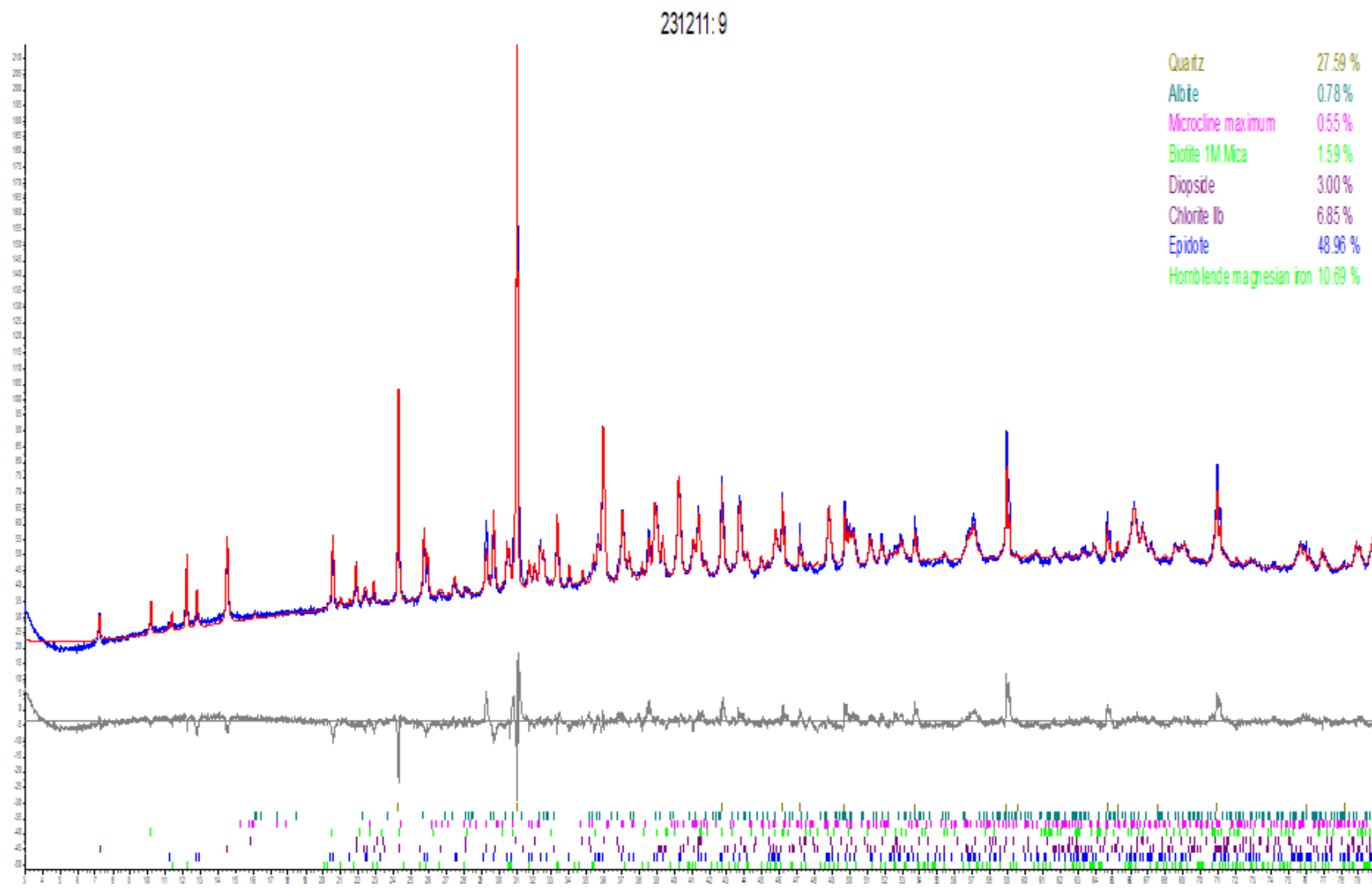
## B Kaksbeskrivelser

Kaksprøve [Nr]	Beskrivelse av kakset
3	Relativt lys (kan skyldes stort vanninnhold, trolig ganske lik som prøve nummer 6). Mye fint materiale. En av de lyseste prøvene. Ligner litt på 33.
6	Grovere. Både mørke og lyse korn. Litt grønnskjær.
9	Tydelig grønnskjær, trolig grønnstein. Grovere korn. Mørkt! Noen litt lysere biter også. Noe lysreflekterende materiale i finstoffet, muligens glimmer.
12	Ganske lik nr. 9, kanskje noe lysere. Veldig lite lysreflekterende materiale/ glimmer (?) i finstoffet.
15	Ganske lik nr. 9 og 12. fortsatt ganske tydelig grønnskjær. Noe lysreflekterende materiale/ glimmer (?) i finstoffet (lik 9)
18	Mørkeste prøven ser det ut til. Nesten svart. Litt grønnskjær men ikke på samme nivå som 9,12,15. litt grovere. Veldig lite lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet.
20	Lyst. Flakete. Større korn. Samme lysreflekterende materiale/glimmer (?) på noen biter og i finstoffet som i prøve 21.
21	Tydeligere lysere. Mye finstoff med lysreflekterende materiale/glimmer (?) i seg (gullfargelignende ved blits på)!
24	Mørkere igjen. Lignende 15, men ikke like mørkt + ikke like mye grønnskjær. Litt lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet som har samlet seg bak i posen.
27	Mørkere enn 24, noe grønnskjær. Ikke antydning til lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet.
30	Veldig lik 27. Muligens litt lysere. Ikke lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet. Noe grønnskjær (spesielt i finstoffet).
33	Tydelig lysere. Felsiske mineraler her. Ikke lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet.
33	Ekstra prøve fra lenger ned på borstangen. Grovere. Mye rødlig/oransj (lignende 33, men mye mer rødlig her). Noen mørkere korn også.
36	Mye rødlig her (Enda mer enn 33). Noen mørke mineraler, men fortsatt ganske lys i fargen. Ikke lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet
39	Lyst, mindre oransj (bare noe, mest i finstoffet). Noe lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet.
42	Veldig lik 39, kanskje enda litt lysere.
45	Grovere. Fortsatt lyst, flere mørkere mineraler, ganske lik 39 og 42.
48	Finere korn. Noe lysere enn 45. Mest felsiske mineraler. Ikke noe lysreflekterende materiale/glimmer (?) omtrent i finstoffet, noen få røde korn.
51	Veldig lik 48 i farge og kornstørrelse. Ikke noe lysreflekterende materiale/glimmer (?) i finstoffet omtrent, flere røde korn.
54	Veldig lik 48, 51 i farge og kornstørrelse. Enda flere røde korn (sammenlignet med 51), ikke noe lysreflekterende materiale/glimmer (?) omtrent.
57	Veldig lik 48, 51 , 54 i farge og kornstørrelse. Noen røde korn, ikke lysreflekterende materiale/glimmer (?) omtrent.
60	Veldig lik 48, 51 , 54, 57 i farge og kornstørrelse. Få røde korn, ikke lysreflekterende materiale/glimmer (?) faktisk.
63	Lik de tidligere, men flere mafiske mineraler. Tydelig lysreflekterende materiale/glimmer (?) (ikke samme nivå som 21, men tydelig). Noen røde korn.
66	Noe grovere korn, men lik de tidligere. Røde korn. Lite lysreflekterende materiale/glimmer (?) (som i 57). Noe mer mafiske mineraler.
69	Lik 66 i kornstørrelse, mer rødlig i fargen enn 66. Noe mer felsiske mineraler, men relativt lik de tidligere. Lite lysreflekterende materiale/glimmer(?).

**Tabell B.1:** Tabell over beskrivelsen av de 25 ulike kaksprøvene hentet fra testbrønn 3. Her vil nummeret gjenspeile borstengeret i berggrunnen. Kaksprøve nr. 9, 21, 27, 39 og 54 ble testet med XRD-analyse.

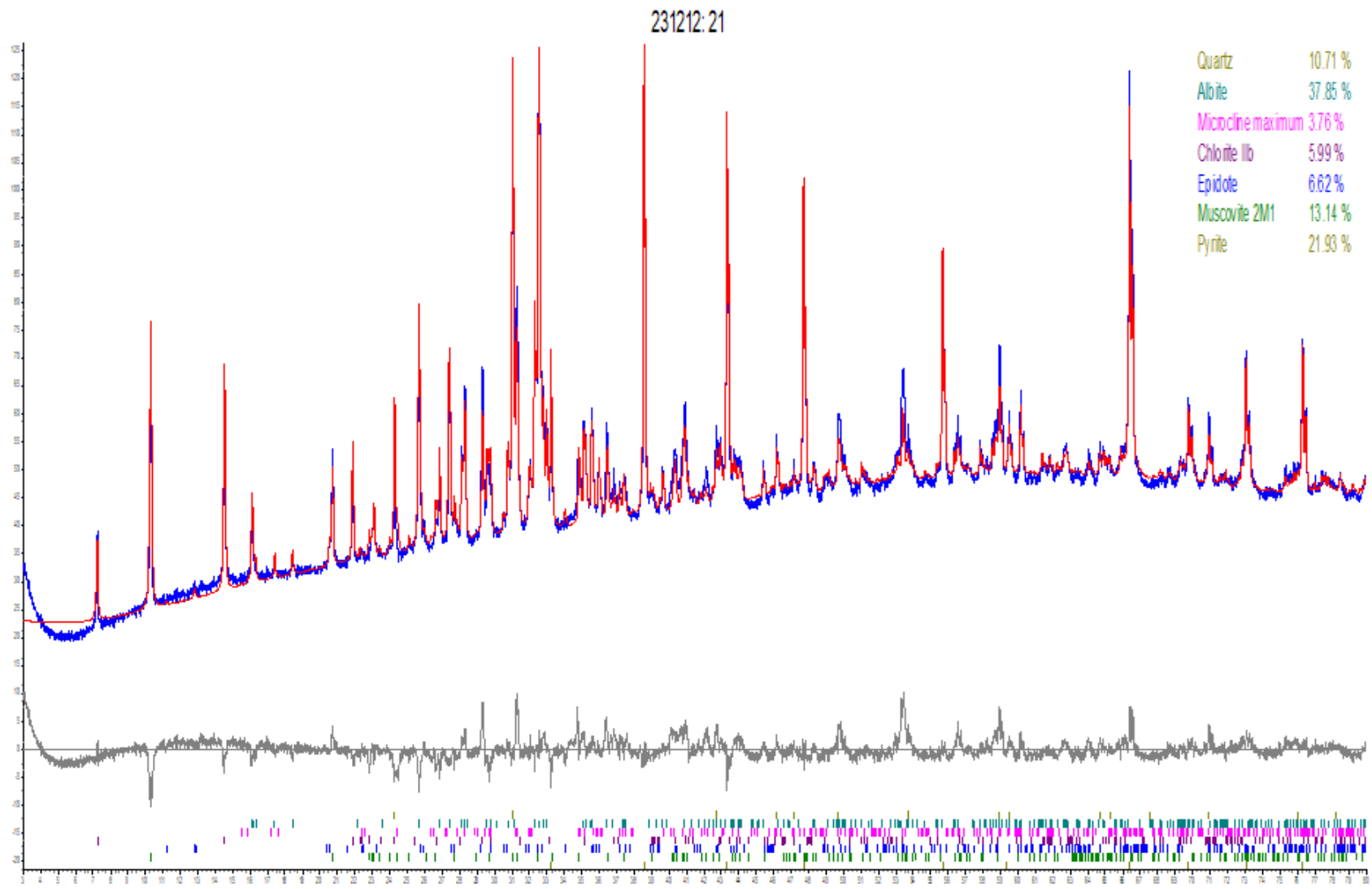
## C XRD-Resultater i Diffrac.TOPAS

119

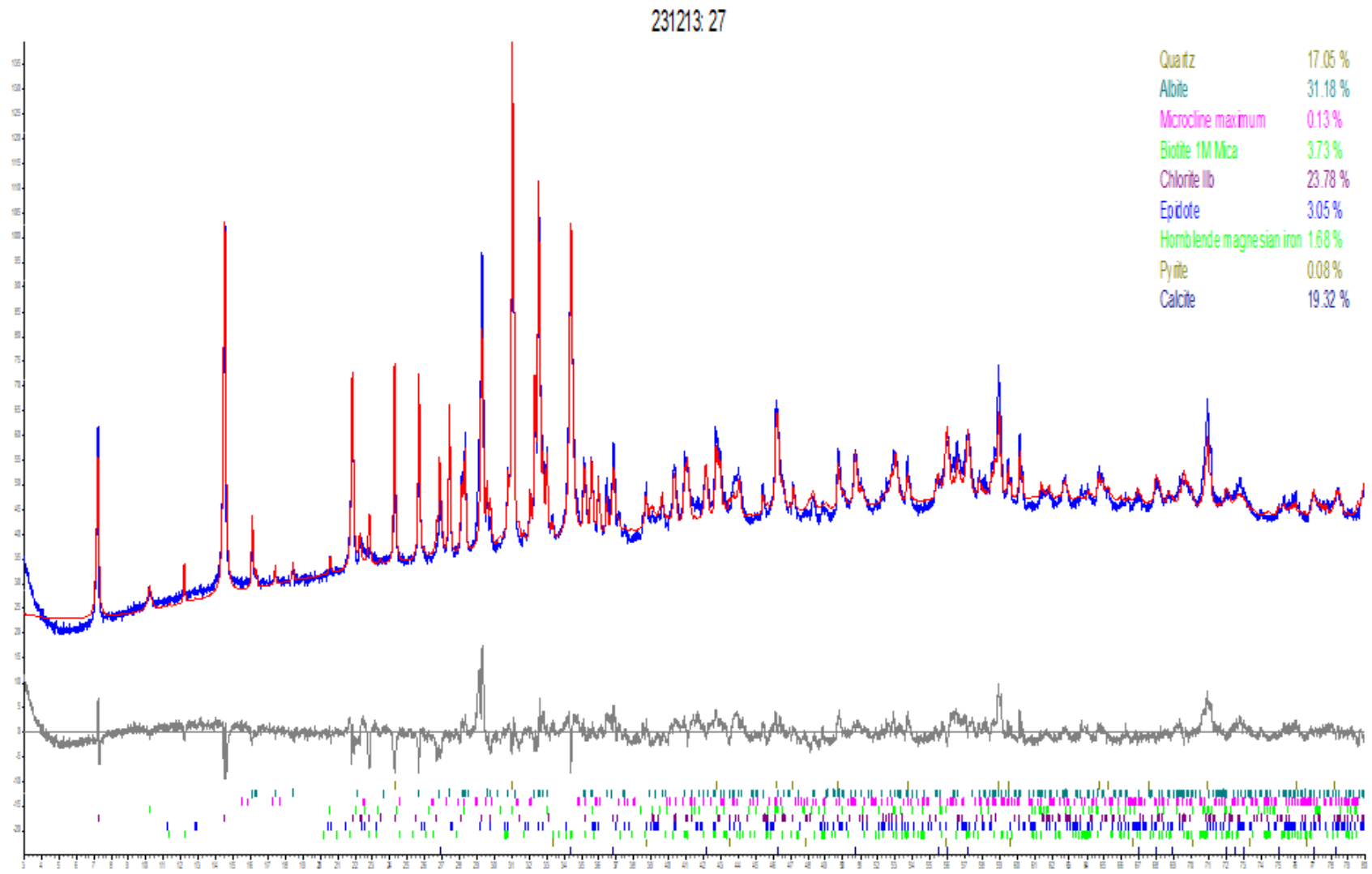


Figur C.1: XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 9.

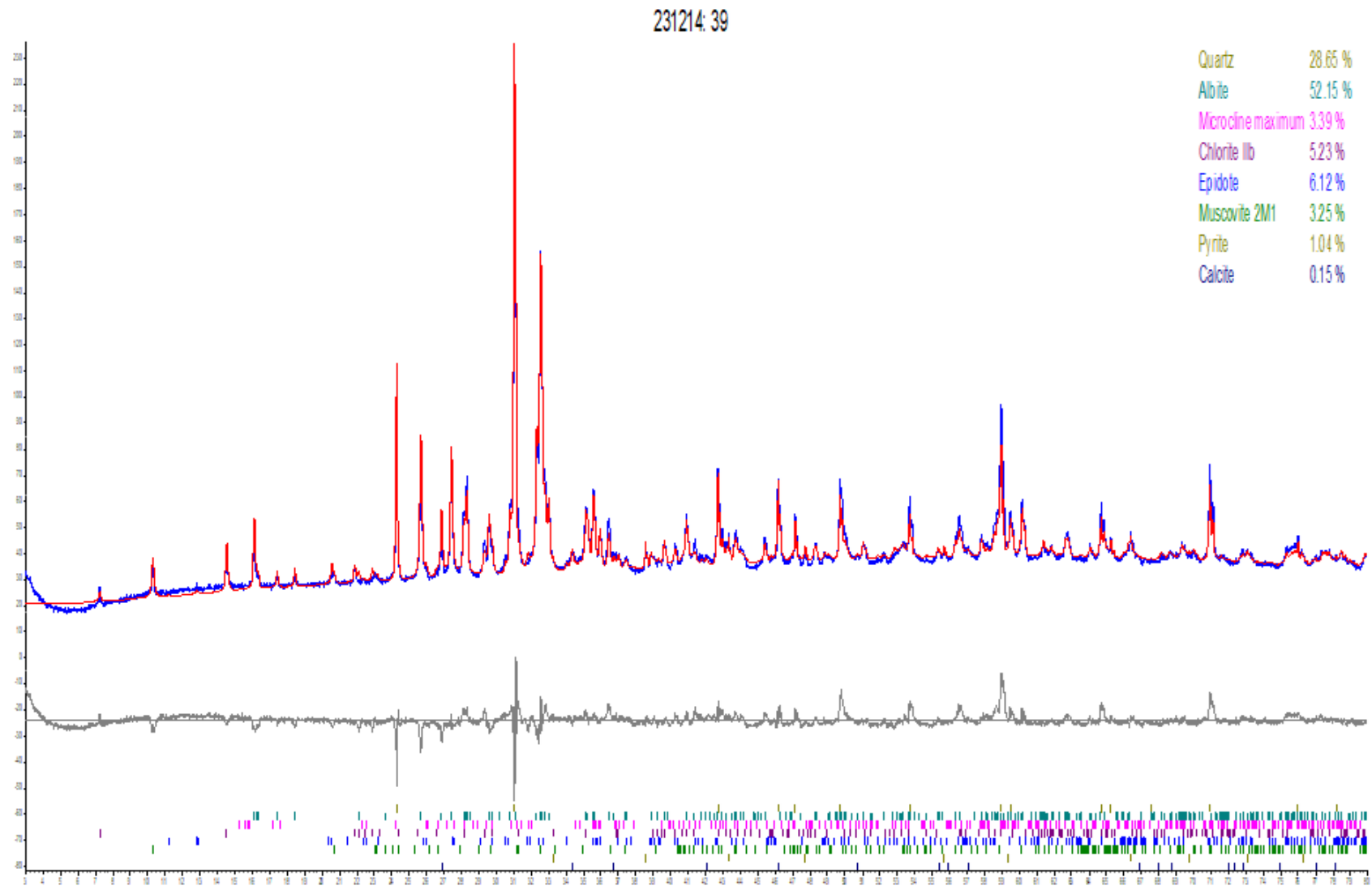




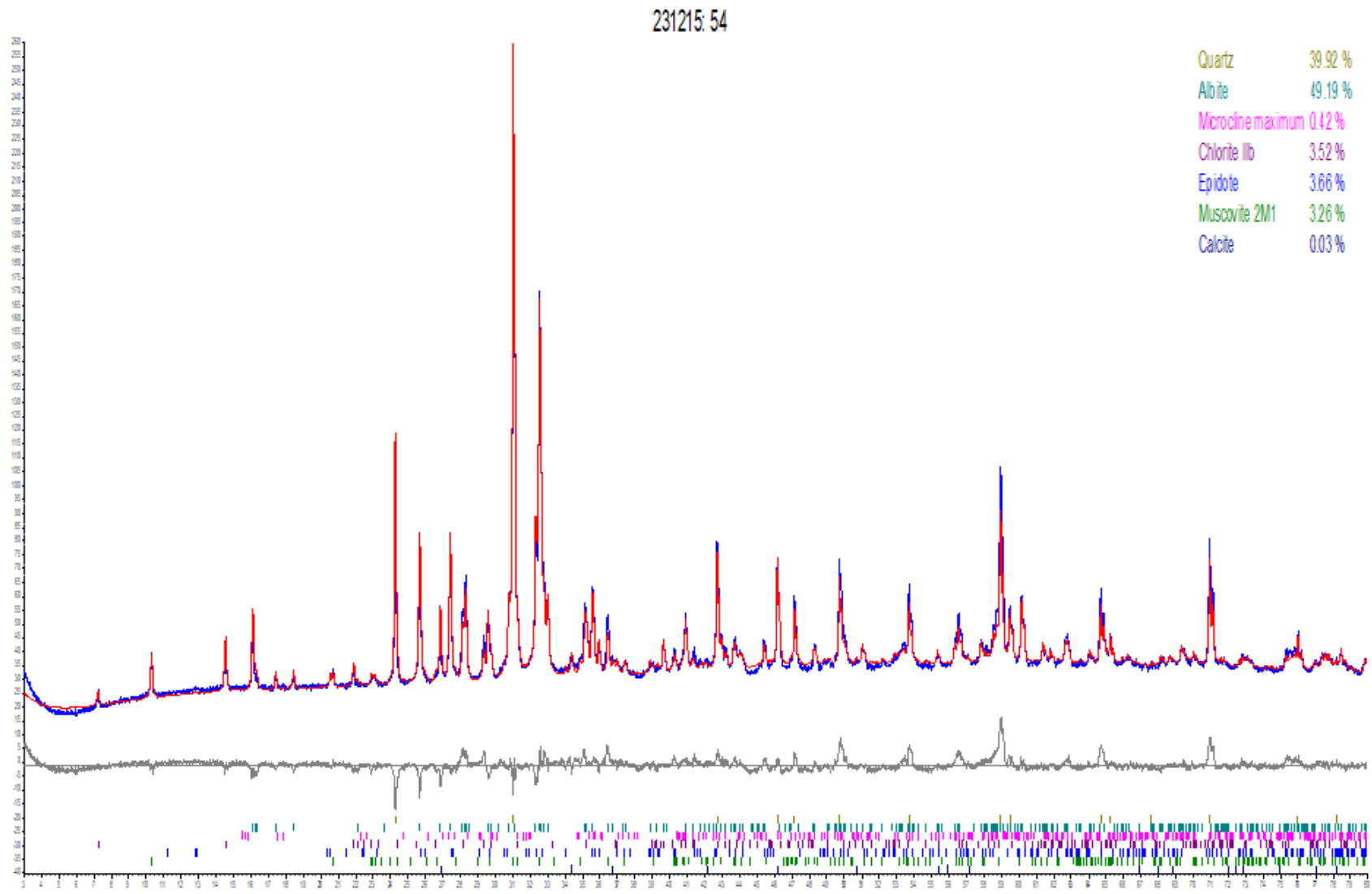
Figur C.2: XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 21.



Figur C.3: XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 27.



Figur C.4: XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 39.



Figur C.5: XRD resultatene etter analyse av kaksprøve nr. 54.

## D Skjerm bilde av inputfilene i Leapfrog

	A	B	C	D	E
1	Hole_ID	x	y	z	max_depth
2	EB1	7035876	571101	0	200
3	EB2	7035862	571140	0	200
4	EB3	7035926	570897	0	208
5	EB4	7035899	570960	0	98
6	EB5	7035849	570946	0	148
7	EB6	7035839	570975	0	159
8	EB7	7035875	571087	0	200
9	TOT1	7035922.27	570902.82	0	7.5
10	TOT3	7035903.26	570963.08	0	3.5
11	TOT4	7035897.12	571000.95	0	4.8
12	TOT5	7035882.13	571030.4	0	4.8
13	TOT6	7035840.94	571102.73	0	6.7
14	TOT7	7035834.34	571125.32	0	7
15	TOT8	7035825.15	571173.75	0	18.7
16	TOT9	7035870.49	570957.12	0	14.5
17	TOT10	7035849.08	570987.41	0	10.7
18	TOT11	7035822.59	571070.74	0	20.9
19	TOT12	7035812.91	571117.84	0	19.7
20	TOT13	7035789.67	571174.66	0	31.2
21	TOT14	7035862.97	570900.21	0	26.8
22	TOT15	7035843.28	570943.81	0	18.5
23	TOT16	7035832.31	570976.27	0	18.4
24	TOT17	7035801.01	571064.64	0	25.7
25	TOT18	7035786.2	571109.944	0	30.7
26	TOT19	7035774.79	571174.36	0	33

**Figur D.1:** Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog for ”collar”. Merk at Excelfilen var lagret som en CSV (semikolondelt).

	A	B	C	D
1	Hole_ID	Depth	Dip	Azimuth
2	EB1	0	90	0
3	EB2	0	90	0
4	EB3	0	90	0
5	EB4	0	90	0
6	EB5	0	90	0
7	EB6	0	90	0
8	EB7	0	90	0
9	TOT1	0	90	0
10	TOT3	0	90	0
11	TOT4	0	90	0
12	TOT5	0	90	0
13	TOT6	0	90	0
14	TOT7	0	90	0
15	TOT8	0	90	0
16	TOT9	0	90	0
17	TOT10	0	90	0
18	TOT11	0	90	0
19	TOT12	0	90	0
20	TOT13	0	90	0
21	TOT14	0	90	0
22	TOT15	0	90	0
23	TOT16	0	90	0
24	TOT17	0	90	0
25	TOT18	0	90	0
26	TOT19	0	90	0

**Figur D.2:** Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog for ”survey”. Merk at Excel filen var lagret som en CSV (semikolondelt).

	A	B	C	D
1	Hole_ID	Depth_from	Depth_to	Lith
2	EB1	0	0.5	Losmasser
3	EB1	0.5	200	Berg
4	EB2	0	0.5	Losmasser
5	EB2	0.5	200	Berg
6	EB3	0	7	Losmasser
7	EB3	7	208	Berg
8	EB4	0	3	Losmasser
9	EB4	3	98	Berg
10	EB5	0	16	Losmasser
11	EB5	16	148	Berg
12	EB6	0	13	Losmasser
13	EB6	13	159	Berg
14	EB7	0	3	Losmasser
15	EB7	3	200	Berg
16	TOT1	0	1.2	Fyllmasser
17	TOT1	1.2	3.6	Sand
18	TOT1	3.6	4.5	Leire
19	TOT1	4.5	7.5	Berg
20	TOT3	0	0.5	Fyllmasser
21	TOT3	0.5	3.5	Berg
22	TOT4	0	0.75	Fyllmasser
23	TOT4	0.75	1.8	Sand
24	TOT4	1.8	4.8	Berg
25	TOT5	0	0.4	Fyllmasser
26	TOT5	0.4	1.8	Sand
27	TOT5	1.8	4.8	Berg
28	TOT6	0	0.8	Fyllmasser
29	TOT6	0.8	3	Sand
30	TOT6	3	3.7	Leire
31	TOT6	3.7	6.7	Berg
32	TOT7	0	0.7	Fyllmasser
33	TOT7	0.7	3	Sand
34	TOT7	3	4	Siltig leire
35	TOT7	4	7	Berg

**Figur D.3:** Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog for "lithology" (1). Merk at Excelfilen var lagret som en CSV (semikolondelt).

	A	B	C	D
36	TOT8	0	0.75	Fyllmasser
37	TOT8	0.75	3.5	Sand
38	TOT8	3.5	15.7	Leire
39	TOT8	15.7	18.7	Berg
40	TOT9	0	1	Fyllmasser
41	TOT9	1	4	Sand
42	TOT9	4	10	Siltig leire
43	TOT9	10	11.5	Leire
44	TOT9	11.5	14.5	Berg
45	TOT10	0	0.75	Fyllmasser
46	TOT10	0.75	4	Sand
47	TOT10	4	5.5	Leire
48	TOT10	5.5	5.95	Sand
49	TOT10	5.95	7.7	Leire
50	TOT10	7.7	10.7	Berg
51	TOT11	0	0.75	Fyllmasser
52	TOT11	0.75	3.8	Sand
53	TOT11	3.8	17.9	Leire
54	TOT11	17.9	20.9	Berg
55	TOT12	0	1	Fyllmasser
56	TOT12	1	3.5	Sand
57	TOT12	3.5	16.7	Siltig leire
58	TOT12	16.7	19.7	Berg
59	TOT13	0	0.75	Fyllmasser
60	TOT13	0.75	3.3	Sand
61	TOT13	3.3	28.2	Leire
62	TOT13	28.2	31.2	Berg
63	TOT14	0	1	Fyllmasser
64	TOT14	1	18.1	Sand
65	TOT14	18.1	23.8	Leire
66	TOT14	23.8	26.8	Berg
67	TOT15	0	0.85	Fyllmasser
68	TOT15	0.85	10	Sand
69	TOT15	10	15.5	Siltig leire
70	TOT15	15.5	18.5	Berg

**Figur D.4:** Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog for "lithology" (2). Merk at Excel filen var lagret som en CSV (semikolondelt).



	A	B	C	D
71	TOT16	0	0.9	Fyllmasser
72	TOT16	0.9	3.6	Sand
73	TOT16	3.6	15.4	Leire
74	TOT16	15.4	18.4	Berg
75	TOT17	0	0.75	Fyllmasser
76	TOT17	0.75	3.8	Sand
77	TOT17	3.8	22.7	Leire
78	TOT17	22.7	25.7	Berg
79	TOT18	0	1.1	Fyllmasser
80	TOT18	1.1	4	Sand
81	TOT18	4	27.7	Siltig leire
82	TOT18	27.7	30.7	Berg
83	TOT19	0	0.8	Fyllmasser
84	TOT19	0.8	3.4	Sand
85	TOT19	3.4	30	Leire
86	TOT19	30	33	Berg

**Figur D.5:** Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog for "lithology" (3). Merk at Excel filen var lagret som en CSV (semikolondelt).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Hole_ID	Depth_from	Depth_to	Kvarts	Albitt	Mikroclin	Biotitt	Diposid	Kloritt	Epidot	Hornblende	Muskovitt	Pyritt	Kalsitt	kommentar							
2	EB3	31	34	0.2759	0.0078	0.0055	0.0159	0.03	0.0685	0.4896	0.1069	NA	NA	NA	pr. 9	tar med løsmassedekke på 7 meter, fra starten av 9 (31m)borestenger til slutten av det (34m)						
3	EB3	67	70	0.1071	0.3785	0.0376	NA	NA	0.0599	0.0662	NA	0.1314	0.2193	NA	pr.21	tar med løsmassedekke på 7 meter, fra starten av 21 (67m)borestenger til slutten av det (70m)						
4	EB3	85	88	0.1705	0.3118	0.0013	0.0373	NA	0.2378	0.0305	0.0168	NA	0.0008	0.1932	pr.27	tar med løsmassedekke på 7 meter, fra starten av 27 (85m)borestenger til slutten av det (88m)						
5	EB3	121	124	0.2865	0.5215	0.0339	NA	NA	0.0523	0.0612	NA	0.0325	0.0104	0.0015	pr.39	tar med løsmassedekke på 7 meter, fra starten av 39 (121m)borestenger til slutten av det (124m)						
6	EB3	166	169	0.3992	0.4919	0.0042	NA	NA	0.0352	0.0366	NA	0.0326		0.0003	pr.54	tar med løsmassedekke på 7 meter, fra starten av 54 (166m)borestenger til slutten av det (169m)						

**Figur D.6:** Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog for ”assay”. Merk at Excel-filen var lagret som en CSV (semikolondelt).

	A	B	C	D
1	Hole_ID	Depth_from	Depth_to	Vannførende lag
2	EB3	190	202	Ja

**Figur D.7:** Skjerm bilde av inputfil i Leapfrog for ”vannforende”. Merk at Excel-filen var lagret som en CSV (semikolondelt).

## E Eksempelutregning av teoretisk varmeledningsevne

### Eksempel utregning av teoretisk varmeledningsevne, kaksprøve 9

$$\lambda_{\text{teoretisk}} = \frac{(\text{vekt\%kvarts} * \lambda_{\text{kvarts}}) + (\text{vekt\%albit} * \lambda_{\text{albit}}) + \dots}{100} = \text{W/m}^* \text{K}$$

$$\lambda_{\text{teoretisk}} = \frac{(27.59 * 8.36) + (0.78 * 2.16) + (0.55 * 2.26) + (1.59 * 3.08) + (3 * 4.44) + (6.85 * 4.48) + (48.96 * 2.84) + (10.69 * 2.84)}{100}$$

$$\lambda_{\text{teoretisk}} = \frac{230.65 + 1.68 + 1.24 + 4.90 + 13.32 + 30.69 + 139.05 + 30.36}{100}$$

$$\lambda_{\text{teoretisk}} = \frac{451.89}{100}$$

$$\lambda_{\text{teoretisk}} = \underline{\underline{4.52 \text{ W/m}^* \text{K}}}$$

Mineral	Varmeledningsevne W/m*K
Albitt	1.95 - 2.34 (2.16)
Biotitt	1.7 - 3.14 (3.08)
Diamant	545.3
Diopsid	4.18 - 4.97 (4.44)
Epidot	2.48 - 3.04 (2.84)
Hornblende	2.4 - 3 (2.84)
Kalsitt	3.16 - 5.0 (3.92)
Kloritt	1.88 - 5.92 (4.48)
Kvarts	6.15 - 11.3 (8.36)
Magnetitt	4.19 - 9.7 (6.47)
Mikroclin	2.04 - 2.57 (2.26)
Muskovitt	2.21 - 3.89 (3.08)
Pyritt	19.21 - 37.9 (26.75)

**Figur E.1:** Eksempelutregning av teoretisk varmeledningsevne på kaksprøve nr. 9. Tabell over varmeledningsevnen til ulike mineraler basert på verdier fra Clauser og Huenges (1995) er tatt med.

