

Lise Tønset

Verdien av kjerneborehull for økt forståelse av stabilitetsforhold ved Åknes skredområde

Masteroppgave i Tekniske geofag

Veileder: Bjørn Nilsen

Juni 2019

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



Lise Tønset

Verdien av kjerneborehull for økt forståelse av stabilitetsforhold ved Åknes skredområde

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Bjørn Nilsen
Juni 2019

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



MASTEROPPGAVE

Prosjektbeskrivelse

Kandidatens navn: Lise Tønset

Oppgavens tittel: VERDIEN AV KJERNEBORHULL FOR ØKT FORSTÅELSE AV STABILITETSFORHOLD VED ÅKNES SKREDOMRÅDE

English title: Value of core drilling for increased understanding of stability conditions at Åknes slide area

Utfyllende tekst:

1. For Åknes skredområde er det i over 30 år utført omfattende grunnundersøkelser og registreringer av bevegelser. Hovedhensikten med dette har vært å etablere grunnlag for å varsle et eventuelt skred før det skjer, men et viktig formål har også vært å fremskaffe grunnlag for vurdering av eventuelt mulige tiltak for å redusere risikoen for skred.

Denne masteroppgaven er en videreføring av fordypningsprosjekt utført av samme student høsten 2018, hvor det ble foretatt sammenstilling og diskusjon av data fra kjerneborhull som var ferdig logget fram til høsten 2018. I det videre arbeid skal tilsvarende sammenstilling gjøres også for hullene som ble boret i 2018, og analyse av borhullsdata skal gjennomføres for etablering av mulige korrelasjoner mellom hullene. I tillegg skal det foretas analyse av mulige korrelasjoner mellom kjerne- og borhullslogger, med hovedvekt på soner hvor det har vært bevegelse.

Som en viktig del av oppgaven skal det også utføres enaks- og triaksialtester av et relevant utvalg borkjerner for undersøkelser av materialtekniske egenskaper og fastlegging av inngangsparametre for numeriske analyser. XRD-analyse skal utføres for å kvantifisere mineralfordelingen, og spesielt glimmerinnholdet i bergartene. Hovedformålet med oppgaven er å bidra til økt forståelse av stabilitetsforholdene i Åknes skredområde, og etablere bedre grunnlag for vurdering av effekten av drenering som mulig stabiliserende tiltak.

2. Oppgaven gjennomføres i samarbeid med NVE og NGI med henholdsvis Lars Blikra/Gustav Pless og Henrik Langeland som eksterne medveiledere.

Studieretning: Ingeniør- og miljøgeologi
Hovedprofil: Ingeniørgeologi og bergmekanikk
Tidsrom: 15.1.2019-11.6.2019

Bjørn Nilsen, Professor/hovedveileder

Sammenheng

Ved Synnølvfjorden i Møre og Romsdal ligger det ustabile fjellpartiet Åkneset. Raser hele fjellpartiet, med et potensielt volum på 54 millioner m³ ned i fjorden vil dette skape en katastrofal flodbølge. På grunn av denne faren har fjellsiden blitt undersøkt og overvåket i over 30 år.

Skredområdets enorme volum gjør det vanskelig å implementere fysiske sikringstiltak for å hindre skred. Derfor ønsker Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) å undersøke om drenering av fjellsiden kan ha en stabiliserende effekt. Et prosjekt er satt i gang for å øke kunnskapen og for å utføre nye undersøkelser ved Åkneset. Denne masteroppgaven er en del av dette prosjektet. I oppgaven er informasjon fra fire nye borekjerner blitt analysert. I tillegg er det gjort en kartlegging av glideplan, samt laboratorietester av kjerprøver fra borehullene. Hovedformålet er å øke forståelsen for skredområdet.

Informasjon fra kjerneloggingen av to borehull fra 2018 er sammenstilt og diskutert. Bergarten er en gneis med variasjon i farge og kornstørrelse. Kjernene består mineraler som kvarts, feltspat og biotitt. Begge kjernene viser høy oppsprekking de første 25-40 meterne og en gradvis overgang til massivt berg ved omtrent 60-70 meters dyp.

DMS (Differential monitoring of stability) målinger har vist hvor det er bevegelse i borehullene. Ved å sammenligne DMS med kjernelogger, kjernebilder og televierer er glideplan forsøkt identifisert. Sonene med bevegelse er tegnet inn i profiler som glideplan. En tolkning av glideplanenes utstrekning er gjort mellom borehullene, og har vist glideplan som i stor grad følger topografien.

Flere av de identifiserte glideplanene ligger i en gneis som er mørkere og mer finkornet enn bergmassen rundt. Bergmassen fra disse skjærsonene er testet på laboratoriet. Det er utført enaksialtest, treaksialtest, tilttest samt måling av tetthet og lydshastighet.

Treaksialtesten ble utført på kjerner fra borehull KH-01-17 og viser en E-modul som spenner fra 8,9-24,3 MPa, Poissons forhold varierer mellom 0,28-0,41 og enaksial trykkfasthet varierer fra 37,5-64,8 MPa. Analyse i RocData ga en Hoek-Brown konstant for intakt berg mellom 3,3-13,3. Dette er lave verdier for både trykkfastheten og Hoek-Brown konstanten sammenlignet med gneis og andre undersøkelser fra Åkneset. Variasjonen i bergartsstyrke ser ut til å ha sammenheng med nærheten til glideplanet. Kohesjon og friksjonsvinkel vil variere med normalspenningen på planet, og er dermed avhengig av høyden til grunnvannsspeilet. Kjerner fra borehull KH-02-17 ble testet enaksialt, og viste mindre variasjon og noe høyere trykkfasthet enn kjernene fra KH-01-17. Disse nye parameterne funnet på laboratoriet kan videre benyttes til numerisk analyse av Åkneset.

Abstract

Åkneset is a slope susceptible to rockslide, located in the mountainside by Synnølvfjorden in the county of Møre and Romsdal, Norway. If the potential volume of 54 million m³ plunges into the fjord, it will generate a devastating tsunami. Therefore, the rock mass has been continuously investigated and monitored for more than 30 years.

Due to the enormous volume, it is challenging to implement physical measures to completely prevent a rockslide. Therefore, the Norwegian Water Resources and Energy Directorate wants to investigate whether the drainage of the mountain side can have a stabilizing effect. A project has been started to increase the level of information and carry out further research into the stability issues of Åkneset; this master thesis is a part of this ongoing research. In this thesis, information from four new drill cores has been analysed. Moreover, identification of the sliding area has been performed alongside laboratory testing of the cores extracted.

Information from the core logging of two boreholes from 2018 is compared and discussed. The rock type is gneiss with variation in both colour and grain size. The cores consist of quartz, feldspar and biotite. Both cores show a high degree of fracturing the first 25-40 meters and a gradual transition towards massive a rock mass at a depth of 60-70 meters.

DMS (Differential monitoring of stability) measurements indicate where there is movement in the boreholes. By comparing DMS with core log, core pictures, and televiewer, the position of the sliding planes has been attempted identified. The extension line of the sliding planes between boreholes has been interpreted and shows that the sliding planes mainly follows the topography.

Several of the identified sliding planes are located in a gneiss that is darker and finer grained compared with the rest of the formation. Rockmass from these shear zones are tested at the laboratory. Uniaxial compressive tests, triaxial compressive tests, tilt tests and measurement of density and sound velocity, were performed in the laboratory.

The triaxial test was performed at cores from bore hole KH-01-17 and showed an E-modulus that ranges from 8.9-24.3 MPa, a Poisson ratio between 0.28-0.41 and a uniaxial compressive strength that varies from 37.5-64.8 MPa. An analysis in RocData gave a Hoek-Brown constant of intact rock between 3.25-13.3. These are low values for both the compressive strength and the Hoek-Brown constant compared to gneiss in general and earlier investigations at Åkneset. The variation in rock strength seems to be related to the proximity to the sliding plane. Cohesion and friction angle vary with the normal stress at the sliding plane and depends on the level of the groundwater table. A uniaxial compression test was performed on the cores from KH-02-17 and showed less variation and slightly higher strength than bore hole KH-01-17. The parameters found in the laboratory can be utilized in numerical modelling of Åkneset.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet for Institutt for geovitenskap og petroleum ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, og er en videreføring av prosjektoppgaven skrevet høsten 2018.

Oppgaven blir skrevet i samarbeid med Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), med Lars Harald Blikra og Gustav Pless som medveiledere. Tusen takk for at jeg fikk mulighet til å skrive om et så spennende tema, og for god hjelp og mottakelse på mine befaringer i Stranda og Åkneset.

Henrik Langeland ved Norges Geotekniske Institutt (NGI) har også bidratt som medveileder. Takk for opplæring i kjerne logging, og for gode og engasjerende diskusjoner. Det har vært meget nyttig for arbeidet med oppgaven. Sammen med Kristin Hilde Holmøy ved NGI har dere gitt meg god hjelp og gode innspill gjennom hele våren.

Hovedveileder ved NTNU, Bjørn Nilsen, har bidratt med erfaringer, gode innspill og faglige diskusjoner om Åkneset. Takk for muligheten for å komme innom kontoret og for gode svar på e-post gjennom hele våren, det har vært til stor hjelp.

På laboratoriet har spesielt Gunnar Vistnes bidratt med vurderinger og gjennomføring av laborietester. Tusen takk for gode svar, diskusjoner og innspill i forbindelse med både utførelse og resultater. Det har vært utrolig viktig. Her rettes også en takk til Jon Runar Drotninghaug for hjelp med bergmekanisk testing og Laurentius Tjihuis for gjennomføring av XRD-analyse.

Takk rettes også til mine foreldre, søsken og Stian for god støtte og avkoblinger denne våren, og ikke minst til Silje og Marte for godt vennskap og samarbeid gjennom fem år på NTNU. Tilslutt vil jeg gi en stor takk til alle mine medstudenter på lesesalen for gode diskusjoner, godt samhold og mange trivelige stunder det siste året.

Trondheim, 10. juni 2019
Lise Tønset

Innhold

Sammendrag	i
Abstract	iii
Forord	v
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Formål og omfang	2
1.3 Grunnlagsmateriale	3
1.4 Begrensninger	4
2 Ingeniørgeologiske forhold ved Åkneset	5
2.1 Beskrivelse av Åknes skredområde	5
2.1.1 Senarier	7
2.1.2 Geologien	7
2.1.3 Sprekkesett og foliasjon	8
2.1.4 Grunnvann	8
2.1.5 Drenering som stabiliserende tiltak ved Åkneset	9
2.1.6 Overvåking og undersøkelser	10
3 Bergmassens egenskaper	11
3.1 Bergmassens styrke og deformasjon	11
3.2 Bruddkriterier	12
3.2.1 Mohr-Coulomb-kriteriet	12
3.2.2 Hoek-Brown-kriteriet	14
3.3 Diskontinuiteter	16
3.3.1 Sprekker i bergmassen	16
3.4 Grunnvannets påvirkning	17
3.4.1 Hydraulisk konduktivitet i bergmassen	17
3.4.2 Effekten på bergmassestyrken	18

3.4.3	Grunnvannstrykkets påvirkning på stabiliteten	18
3.5	Fjellskred	19
3.5.1	Definisjoner og klassifisering	19
3.5.2	Årsaker	19
4	Nytten av kjerneboring, kjernelogging og borehullslogging	21
4.1	Kjerneboring	21
4.2	Kjernelogging	23
4.2.1	Parametrene som registreres ved kjernelogging	23
4.3	Borehullslogging	24
4.3.1	DMS - differential monitoring of stability	24
4.3.2	Televiever	25
5	Momenter fra prosjektoppgaven	27
5.1	Oversikt over kjerneboringer ved Åkneset	27
5.1.1	Kjernelogging	29
5.2	Sammenstilling og vurdering av data fra borehull	30
5.2.1	Utarbeidelse av profiler	30
5.2.2	Vurdering av profiler og borehullsdata	33
6	Kjernelogging av 2018-borehullene	35
6.1	Kjernelogging av KH-01-18	36
6.1.1	RQD, sprekkefrekvens og knusningssoner	36
6.1.2	Sprekkeparameterne	37
6.1.3	Beskrivelse av bergmassen	37
6.2	Kjernelogging KH-02-18	38
6.2.1	RQD, Sprekkefrekvens og knusningssoner	38
6.2.2	Sprekkeparameterne	39
6.2.3	Beskrivelse av bergmassen	41
6.3	Profiler basert på oppsprekkingen	41
6.3.1	Oppsummerende bemerkninger	42
7	Kartlegging av glidesoner	43
7.1	Borehull med DMS	43
7.2	Korrelasjon mellom kjernebilder og televieverbilder	45
7.3	Glidesoner i KH-02-17	46
7.3.1	Identifisering av glideplan	46
7.3.2	Beskrivelse av bergmassen og sprekkeparameterne	46
7.4	Glideplan i KH-01-17	48
7.4.1	Identifisering av glideplan	48
7.4.2	Beskrivelse av bergmassen og sprekkeparameterne	50
7.5	Glideplan i KH-01-12	51
7.5.1	Identifisering av glideplan	51
7.5.2	Beskrivelse av bergmassen og sprekkeparameterne	53

7.6	Glideplan i KH-03-06 og KH-02-06	54
7.6.1	Identifisering av glidesoner i KH-03-06	54
7.6.2	Identifisering av glidesoner i KH-02-06	55
7.7	Oppsummerende bemerkninger	57
8	Tolkning av glideplan i profiler	59
8.1	Tolkning av glideplan	59
8.1.1	Metode	59
8.1.2	Resultat av tolkningen	59
8.2	Oppsummerende bemerkninger	63
9	Labororientesting	65
9.1	Informasjon om materiale	65
9.1.1	Lokasjon og prøvemateriale	65
9.2	Teori og metode	68
9.2.1	Tetthet og lydastighet	68
9.2.2	Tilttest	69
9.2.3	Enaksiell trykkfasthet	70
9.2.4	Treaksialtest	71
9.2.5	XRD	72
9.2.6	Preparering av prøver	73
9.3	Resultater	74
9.3.1	Resultater fra KH-01-17	74
9.3.2	Resultater for KH-02-17	79
9.4	Oppsummerende betraktninger	82
9.4.1	Sammenligningsverdier	82
9.4.2	Diskusjon av resultater fra kjernene fra KH-01-17	82
9.4.3	Diskusjon av resultater fra KH-02-17	85
10	Analyse av laboratorieresultater	87
10.1	Beregning av friksjonsvinkel og kohesjon fra laboratorieresultatene	87
10.2	Analyse av laboratorieresultatene i RocData	89
10.2.1	Mohr-sirkler og lineærregresjon	89
10.2.2	Valg av parametere	92
10.3	Oppsummerende bemerkninger	93
11	Normalkraftens påvirkning på kohesjon og friksjon	95
11.1	Normalspenningens variasjon med grunnvannstrykket	95
11.1.1	Valg av modell	95
11.1.2	Vanntrykkets påvirkning på normalkraften	98
11.1.3	Friksjonsvinkel og kohesjon fra RocData	99
11.2	Oppsummerende bemerkninger	99
12	Diskusjon	101

12.1	Kartlegging av glideplan	101
12.2	Laboratoriearbeid	102
12.2.1	Faktorer som påvirker laboratorieresultatet	102
12.2.2	Treaksialtesting av KH-01-17	103
12.2.3	Enaksialtesting av kjerner fra KH-02-17	104
12.3	Verdien av kjerneboringer	104
12.4	Sammenstilling av informasjon	105
12.5	Effekten av drenering	105
13	Konklusjon	107
14	Forslag til videre arbeid	109
	Referanser	115
	Vedlegg	I
A	Geological strength index (GSI)	III
B	Sprekkeparametre	V
C	Inklinometermålinger fra DMS	VII
D	Laboratorieresultater	XIX
D.1	Materiale fra KH-01-17	XIX
D.2	Materiale fra KH-02-17	XXI
D.3	XRD	XXII

Innledning

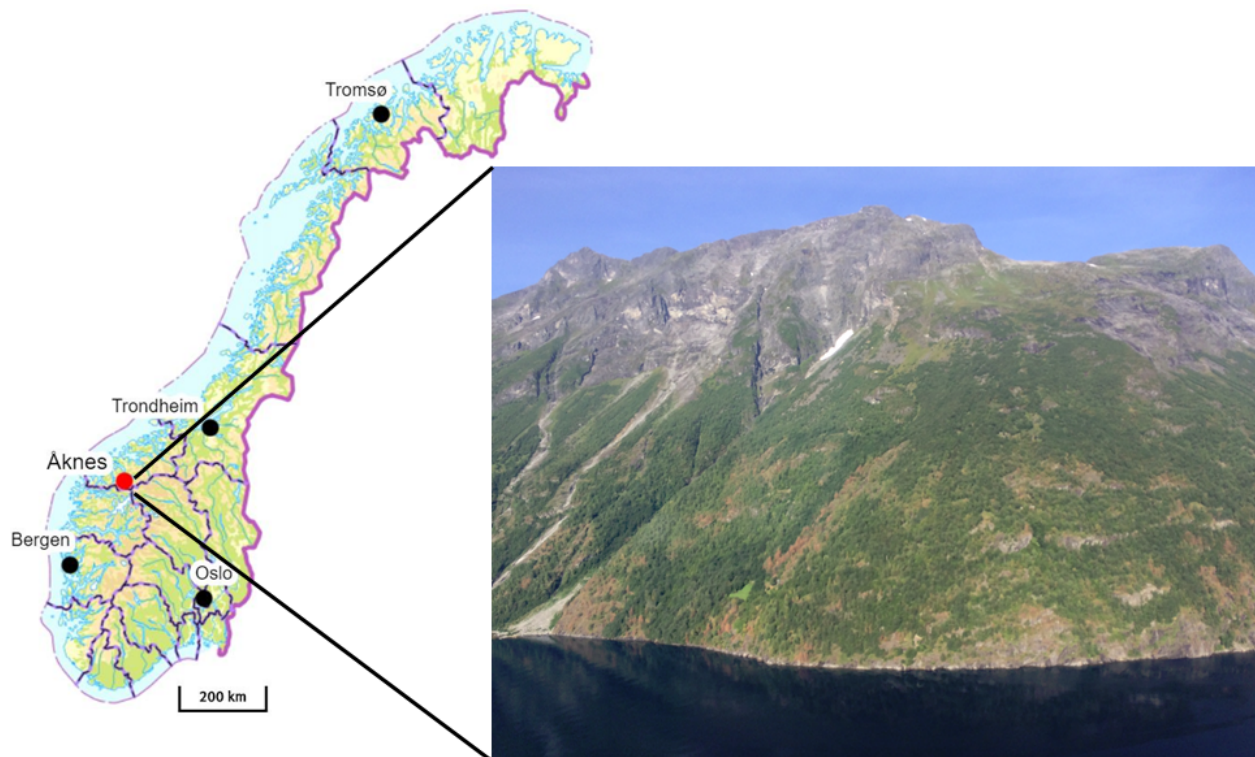
1.1 Bakgrunn for oppgaven

Gjennom historien har Norge med sine høye fjell og dype fjorder alltid vært utsatt for skredhendelser, de fleste i relativt kort tid etter siste istid. Statistikken viser at det skjer 2-3 store fjellskred med påfølgende flodbølger hvert århundre. Eksempler på slike hendelser er skredene i Loen (1905 og 1936) og Tafjord (1934). I alle disse tre tilfellene løsnet et stort fjellparti fra fjellsiden og traff innsjøen nedenfor. Dette genererte enorme flodbølger som tilsammen tok 175 menneskeliv (Vorren *et al.*, 2013).

I dag overvåkes sju ustabile fjellparti av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) (NVE, 2017). Ett av disse fjellpartiene er Åknes skredområde ved Synnlyvsfjorden i Møre og Romsdal, se figur 1.1.

Denne masteroppgaven vil omhandle dette ustabile fjellpartiet, Åkneset. Et skred herfra vil rase ned i fjorden med et potensielt volum på 54 millioner m³. Flodbølgene som skapes ved et skred fra hele fjellpartiet kan ramme hele 10 kommuner i distriktet. Hellesylt og Geiranger vil bli hardest rammet med bølger som når henholdsvis 85 og 70 meter opp på land (NVE, 2018).

Åknes skredområde har blitt overvåket og undersøkt i over 30 år. Dette for å kunne varsle et eventuelt skred før det inntreffer, og for å finne mulige tiltak for å redusere skredfaren. Drenering av grunnvann fra inne i fjellsiden har blitt ansett som et potensielt sikringstiltak. Økte klimaendringer og større mengde nedbør har ført til at NVE har satt i gang et prosjekt for å undersøke om drenering kan bidra til å stabilisere skredområdet (NVE, 2018). Dette inkluderer flere forundersøkelser og prosjekter for å øke kunnskapsnivået.



Figur 1.1: Fjellpartiet Åknes befinner seg på vestsiden av Synnølvfjorden i Møre og Romsdal. Modifisert av forfatter etter Norgeskart og Åge Kjølås/NVE.

1.2 Formål og omfang

Denne masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven skrevet av samme forfatter høsten 2018, «Åknes skredområde- sammenstilling og diskusjon av borehullsdata» (Tønset, 2018). Hensikten er å benytte kjerneborehull for å øke forståelsen av stabilitetsforholdene ved Åknes skredområde.

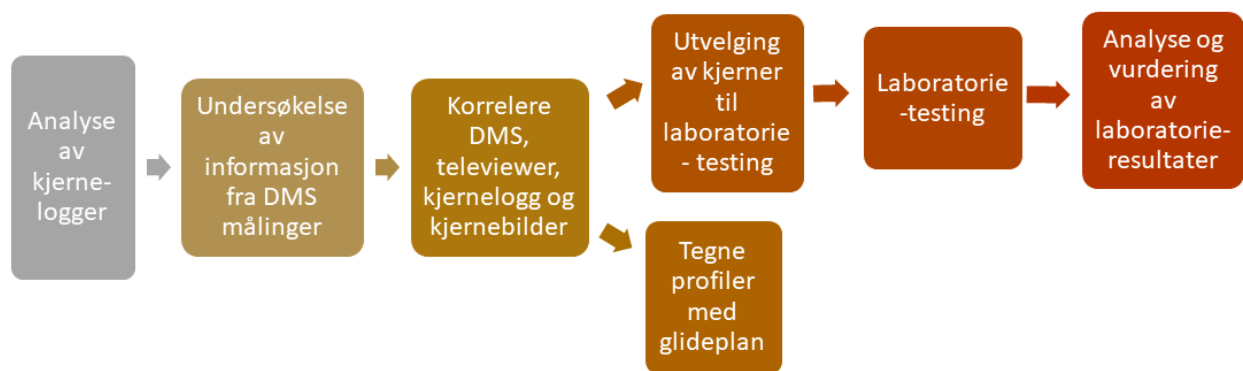
Oppgaven består av flere deler. Innledningsvis introduseres Åkneset og grunnleggende teori som brukes for å underbygge vurderinger gjort senere i oppgaven. Deretter skal det gis en oppsummering av viktige momenter fra prosjektoppgaven. Som en videreføring av arbeidet gjort i prosjektoppgaven skal resultatene fra kjerneborehullene fra 2018 sammenstilles og presenteres. Dette for å kunne se sammenhenger og korrelasjoner mellom de forskjellige borehullene.

Hoveddelen av masteroppgaven vil omhandle glideplanene og bergmassen rundt disse. Først identifiseres glideplanenes lokasjon i borehullene. Dette skal tegnes inn i profiler, og en videre tolkning av glideplanenes utstrekning skal gjøres. Deretter skal karakteristiske trekk ved bergmassen rundt glideplanene finnes ved å sammenligne og korrelere DMS (Differential monitoring of stability) målinger, kjerneborehull, kjernebilder og televuebilder. Kjerneprøver

fra bergmassen rundt glideplanene skal tas ut og brukes til laboratorietesting for å undersøke bergartens egenskaper ved skjærsonene. Det skal utføres enaksial- og treaksialtester for undersøkelse av materialtekniske egenskaper og for fastlegging av inngangsparametere for numerisk analyse. XRD-analyse gjennomføres for å kvantifisere mineralinnholdet, spesielt med tanke på glimmer. I tillegg utføres tilttest, samt måling av lydshastighet og tetthet. Resultatene analyseres ved bruk av programmet RocData (RocScience Inc., 2017).

Hovedformålet er at kartleggingen av glideplanene og laboratorieresultatene skal bidra til en økt forståelse for skredområdet, og etablere et bedre grunnlag for vurdering av effekten av drenering som mulig stabiliserende tiltak.

Arbeidsflyten i hoveddelen av masteroppgaven er illustrert i figur 1.2.



Figur 1.2: Flytskjemaet viser metoden i hoveddelen av masteroppgaven.

1.3 Grunnlagsmateriale

Deler av grunnlagsmaterialet er basert på arbeid gjort i prosjektoppgaven (Tønset, 2018). En oppsummering av viktige momenter blir gitt i kapittel 5.

Mye data og flere logger og rapporter er hentet fra NVE og prosjektets ftp-server (NVE, 2019). Prosjektspesifikt og upublisert materiale hentet fra ftp-serveren refereres til som (NVE, 2019) og omfatter:

- Datasett fra kjerneloggingen av KH-01-18, KH-02-18, KH-01-17, KH-02-17 og KH-01-12.
- Drainage Åknes, Datareport core logging KH-01-18 *Kjerneloggingsrapport fra NGI-skrevet av Henrik Langeland*
- Drainage Åknes, Datareport core logging KH-02-18 *Kjerneloggingsrapport fra NGI-skrevet av Henrik Langeland*

- Drainage Åknes, Datareport core logging KH-01-17 *Kjerneloggingsrapport fra NGI-skrevet av Henrik Langeland*
- Drainage Åknes, Datareport core logging KH-02-17 *Kjerneloggingsrapport fra NGI-skrevet av Henrik Langeland*
- Kjernebilder
- Televuebilder
- DMS målinger
- NVEs prosjektfil i ArcGIS er benyttet som grunnlag for ulike kart.

Alle kart som presenteres er laget i ArcGIS med grunnlagsmateriale om prosjektet hentet fra NVE, topografisk kart hentet fra norgeskart og berggrunnskart hentet fra NGU.

1.4 Begrensninger

Målet med laboratorieundersøkelsene var i utgangspunktet å kjøre treaksialtest på to ulike lokasjoner, kjerner fra borehull KH-01-17 og KH-02-17. Det viste seg å være vanskelig å skaffe et tilstrekkelig antall kjerner på grunn av den høye oppsprekningen. En treaksialtest krever større antall kjerner for å få troverdige resultater enn enaksialtesten. Derfor ble det besluttet å kjøre treaksialforsøk på kjernene i KH-01-17 og enaksialforsøk på kjernene fra KH-02-17.

Kjerneborehullene fra 2018, KH-01-18 og KH-02-18, er foreløpig ikke instrumentert med DMS. Dette gjør at vurderingene fra disse borehullene kun blir basert på kjerneloggen og tolkninger.

Mange undersøkelser har tidligere blitt gjort ved Åkneset. Å ha så store mengder data er et stort privilegium, men er også en utfordring å håndtere når data skal sammenstilles og settes i perspektiv.

Å gi en vurdering av effekten av drenering er utfordrende med resultatene oppnådd i denne masteroppgaven. Selv om resultatene i seg selv sier lite om effekten, kan de brukes videre i modelleringer som på sikt kan gi et innblikk i denne effekten.

Ingeniørgeologiske forhold ved Åkneset

2.1 Beskrivelse av Åknes skredområde

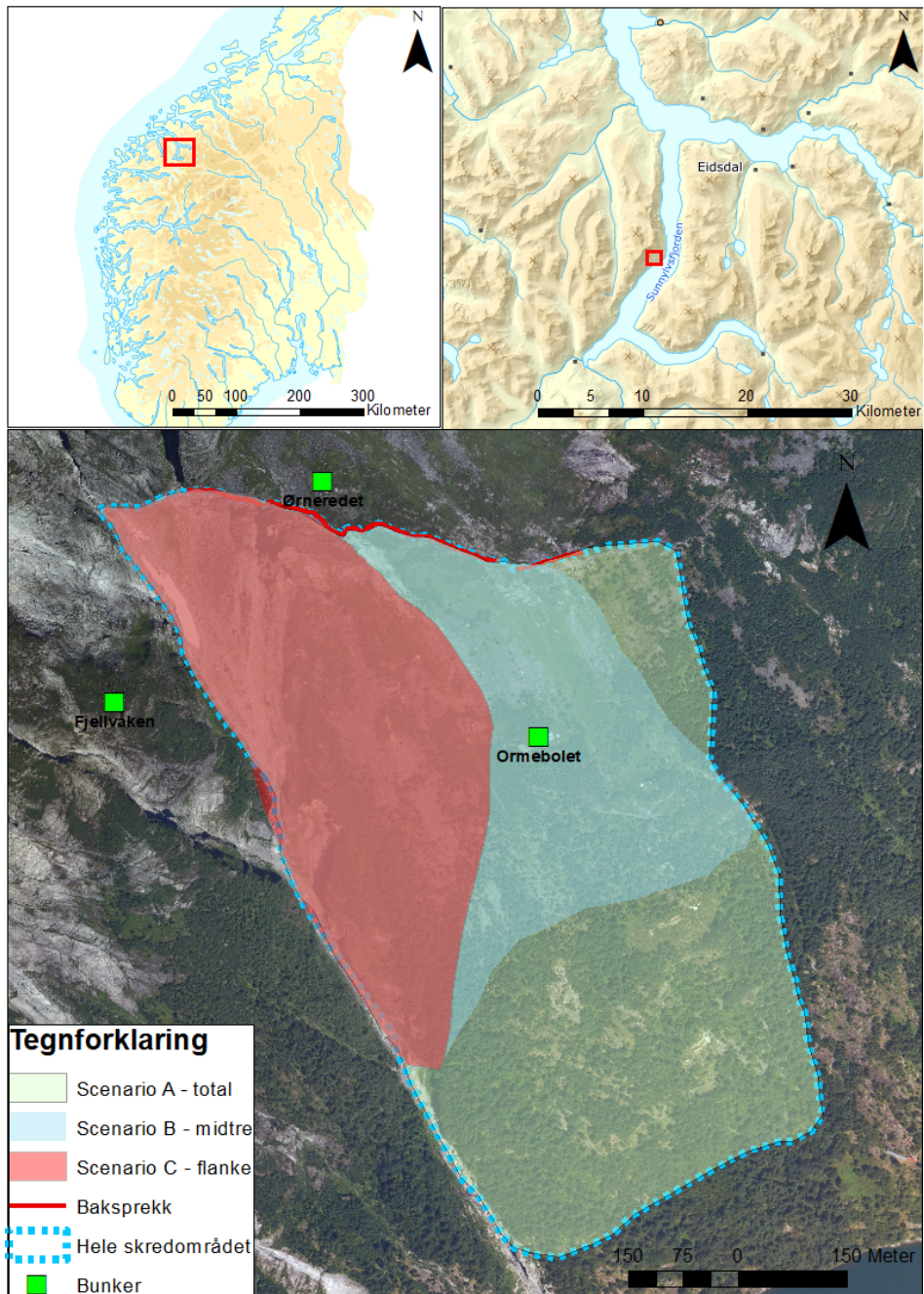
Fjellpartiet Åknes er lokalisert på vestsiden av Synnølvfjorden i Møre og Romsdal, og har et maksimalt volum på 54 millioner m³. I deler av området er det registrert bevegelser på 6-8 cm/år (NVE, 2018).

Åkneset har en bratt topografi med et gjennomsnittlig fall på 30°-35° mot sør (Ganerød *et al.*, 2008). Figur 2.1 viser partiets baksprekk som befinner seg omtrent 700-900 moh. og strekker seg 800 meter i Ø-V retning (Grøneng, 2010). Vestsiden av sprekken er mest velutviklet, men dybden er vanskelig å fastslå da den består av både skredmateriale og snø (Ganerød *et al.*, 2008).



Figur 2.1: Baksprekken strekker seg omtrent 800 meter i N-Ø retning. Foto: L. Kristensen/NVE

Både vest og østsiden av skredområdet er avgrenset av forkastningssoner. Åknesrenna definerer vestsiden av fjellpartiet mens en mindre markert forkastning avgrenser partiet i øst (Ganerød *et al.*, 2008). Hvor skredfoten befinner seg er ikke sikkert definert, men den er antatt å ligge ved omtrent 100 moh. (Langeland, 2014). Skredets totale begrensning kan man se i figur 2.2.



Figur 2.2: De tre hovedscenariene er markert på bilder. Størst sannsynlighet har senario c, den vestre flanken, som beveger seg med en hastighet på 6-8 cm/år.

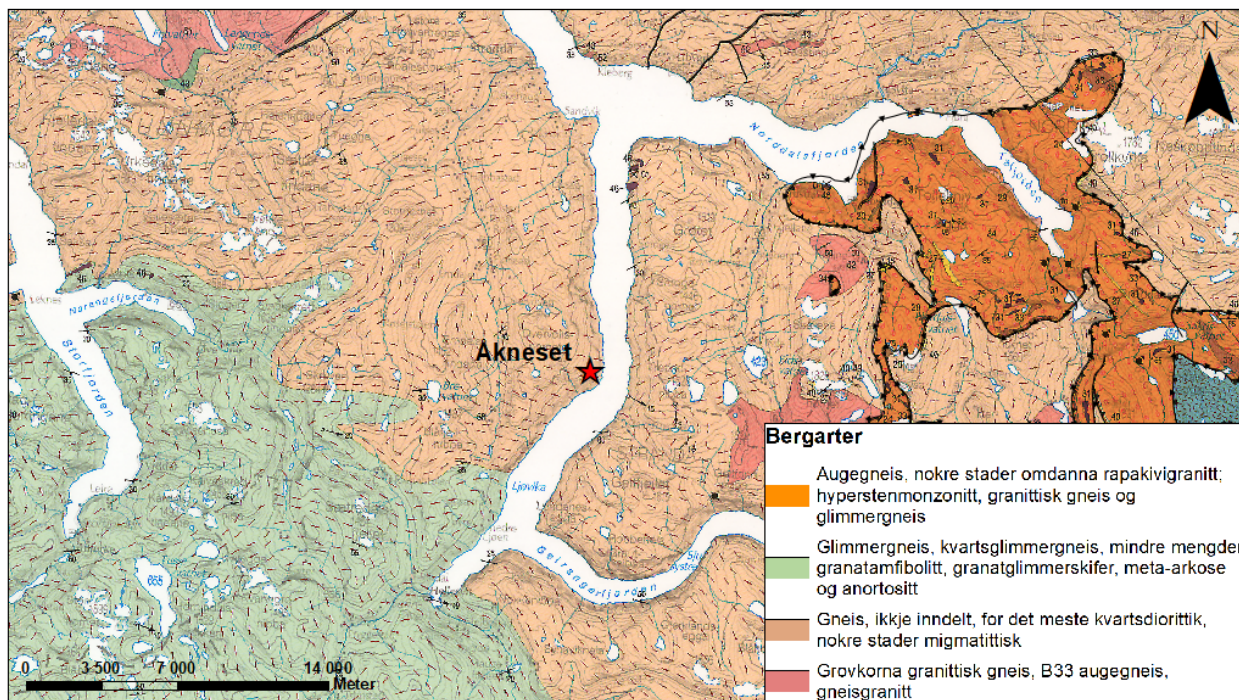
2.1.1 Senarier

Blikra (2012a) deler skredområdet inn i tre scenarier basert på omfattende undersøkelser, modelleringer og laboratorieeksperimenter gjennomført mellom 2004 og 2012. De tre scenariene er vist i figur 2.2. Inndelingen i scenarier baserer seg på volum og hvor mye de ulike partiene beveger seg (Blikra, 2012a, Hole *et al.*, 2011). Blikra (2012a) legger vekt på at det er usikkerheter knyttet til klassifiseringen.

- **Senario A** omfatter hele det potensielle skredområdet på 54 millioner m³.
- **Senario B** omfatter området med aktiv bevegelse og har et volum på 18 millioner m³. Dette område beveger seg 2-4 cm/år.
- **Senario C** omfatter området med størst bevegelse og består av et volum på 6-11 millioner m³. Dette område har en bevegelse på 5-8 cm/år.

2.1.2 Geologien

Åkneset plasserer seg omtrent midt i det som kalles den «den vestre gneisregionen» som strekker seg fra Sogn i sør til Trøndelag i nord. De stedlige bergartene består stort sett av prekambriske bergarter fra jordas urtid som ble deformert og omdannet under den kaledonske fjellkjedefoldingen (Lautro *et al.*, 1998). Som vist i figur 2.3 er gneis den mest utbredte bergarten lokalt i området.



Figur 2.3: Berggrunnskart viser at Åkneset består av gneis, for det meste kvartsdiorittisk, enkelte steder også migmatittisk. Kart modifisert av forfatter etter NGUs berggrunnskart.

Gneisen har en velutviklet lagdeling som heller parallelt med overflaten og ned mot fjorden (Blikra, 2012a). Foldingene som er registrert har en bratt helning i det øvre partiet, mens den gradvis blir mer parallell med overflaten ned mot fjorden. Gneisene er for det meste kvartsdiorittisk til granittisk, men stedvis også migmatittisk. Bergartenes mineralinnhold og utseende varierer, men de fleste har lagvise bånd av enten lys kvarts og feltspat eller mørke bånd av biotitt og hornblende (Lautro *et al.*, 1998).

2.1.3 Sprekkesett og foliasjon

Det er utført en rekke geologiske undersøkelser ved Åkneset. Den strukturgeologiske overflatekartleggingen har som tidligere nevnt vist at fjellsiden består av foldede gneiser. Foliasjonen har strøk i Ø-V retning, og går fra å ha et steilt fall i øvre deler til å bli mer sub-horisonal ned mot fjorden (Ganerød *et al.*, 2008). Undersøkelser gjort av Kveldsvik *et al.* (2006) viser at fallvinkelen til foliasjonen generelt hadde samme fall som skråningen, 35°- 40°. I følge Ganerød *et al.* (2008) er foliasjonen med på å kontrollere utviklingen til baksprekken og glideplanene. Også Grøneng (2010) anser den skråningsparallele foliasjonen, i tillegg til den bratte topografien, som medvirkende årsaker til ustabiliteten ved Åkneset.

Sprekkefrekvensen er størst vinkelrett på foliasjonen. Dette er naturlig siden gneisen vil være svakere og ha lettere for å sprekke opp langs foliasjonen. Sprekkefrekvensen øker også i de områdene der bergmassen har biotittrike lag, mens den blir mer massiv i områdene med granittisk gneis (Ganerød *et al.*, 2008).

Tre distinkte sprekkeseett er funnet. Sprekkesettene strøk og fall er indikert i tabell 2.1. Hvor dominerende disse sprekkeseettene er varierer fra lokasjon til lokasjon.

Tabell 2.1: Tre distinkte sprekkeseett er registrert ved Åkneset (Ganerød *et al.*, 2008)

Sprekkesett	Strøk	Fall
1	Ø-V	Parallelt med foliasjonen (langs fjellsiden)
2	Ø-V	Vertikalt fall
3	N-S	Vertikalt fall

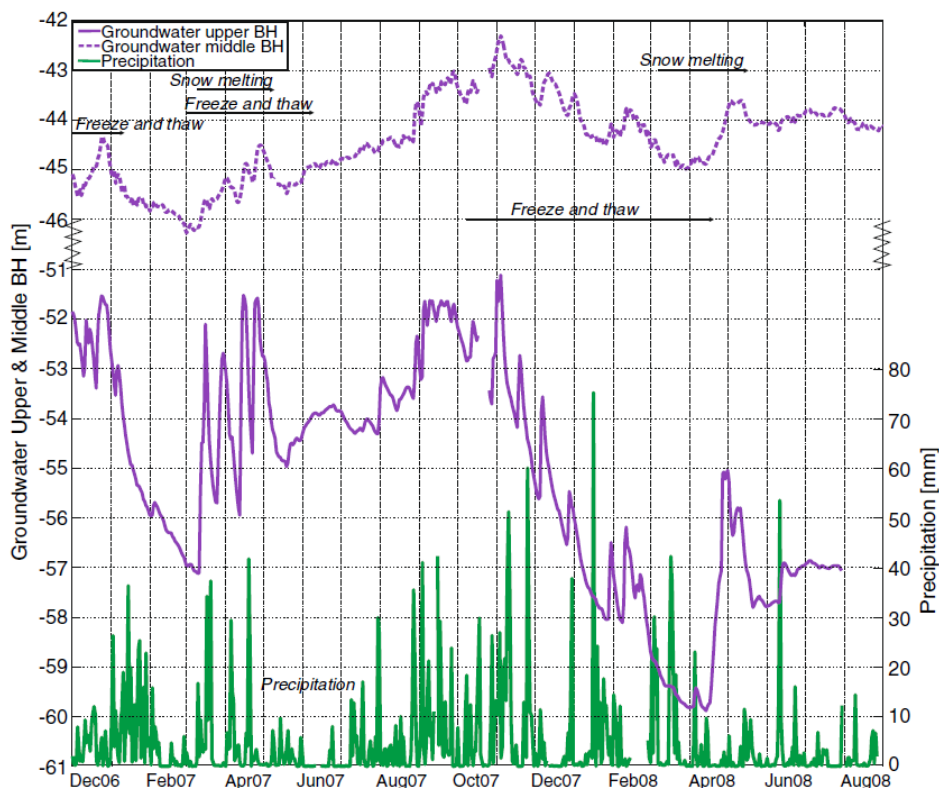
2.1.4 Grunnvann

Grunnvannssystemet ved skredområdet er komplekst, og kontrolleres hovedsakelig av nedbør som renner ned i baksprekken og infiltrasjon direkte på skredområdet (Grøneng *et al.*, 2009a). I tillegg mates fjellpartiet av vann fra resten av nedfallsområdet. Mengden vann er sesongavhengig, med spesielt stor økning ved snøsmeltingen om våren og ved store nedbørsperioder på høsten.

Flere vannkilder er observert på selve skredområde. Ved den antatte skredfoten siver det ut vannkilder med rikelig volum. Ved de nedre delene av fjellpartiet, ned mot fjorden, er

grunnvannsnivået nær overflaten (Ganerød *et al.*, 2008).

Grunnvannsnivået i borehullene ble i 2011 målt med piezometer installert i DMS-kolonner i det midtre og øvre borehullet (hhv. KH-02-06 og KH-01-06). I følge Grøneng *et al.* (2009a) ligger grunnvannsnivået i det midtre borehullet på dyp mellom 42,5 og 46,5 meter og mellom 51-60 meter i det øvre. Grunnvannsspeilet fluktuerer med sesongene, noe som indikerer et delt grunnvannsregime (Grøneng *et al.*, 2009a). Fluktuasjonen er størst i det øvre borehullet, noe som kan kobles til dens nærhet til baksprekken som infiltrerer mye nedbør og smeltevann. Grøneng *et al.* (2009a) viser hvordan grunnvannsstanden varierer i løpet av året i figur 2.4.



Figur 2.4: Grunnvannsnivået ved øvre og nedre borehull (hhv. KH-01-06 og KH-03-06)(Grøneng *et al.*, 2009a).

2.1.5 Drenering som stabiliserende tiltak ved Åkneset

Tilstedeværelsen av grunnvann kan ha skadelig effekt på stabiliteten til skråninger, og det er derfor viktig å ha god kunnskap om hvordan grunnvannsforholdene påvirker stabiliteten (Wyllie og Mah, 2004).

På grunn av Åknesets enorme volum vil det være vanskelig å iverksette fysiske sikringstiltak. Et potensielt sikringstiltak kan være å drenere fjellsiden slik at grunnvannsspeilet senkes til under glideplanet (Blikra, 2012a). Dette bidrar til redusert vanntrykk og kan være med på

å stabilisere fjellpartiet. For å finne ut hvor effektivt drenering vil være kreves økt kunnskap om blant annet bergmassen, vannførende sprekker, strømningsmønster og hvordan vannet kan ledes ut. Som nevnt er et omfattende undersøkelsesprogram satt i gang av NVE. Dette skal være ferdig i 2020.

2.1.6 Overvåking og undersøkelser

Overvåkningsprosjektet ved Åkneset er i dag et av de største i verden (Grøneng, 2010). Fjellsiden blir kontinuerlig overvåket for å registrere bevegelser i skredområdet, noe som gir viktig informasjon om bevegelsesmekanismer og utviklingen til skredet (Langeland, 2014).

På overflaten overvåkes fjellsidens bevegelser. Dette gjøres med GPS og totalstasjon (måler avstand til prismer i fjellsiden), ekstensometer og laser (registrerer sprekkeutvidelse) og InSAR (radarmålinger fra satellitt som registrerer deformasjoner i landskapet) (Blikra, 2012b, Langeland, 2014). I tillegg er en meteorologisk stasjon installert på oversiden av skredområdet, 900 moh. Under overflaten overvåker DMS-kolonner forholdene i borehullene. En beskrivelse av DMS-systemet blir gitt i kapittel 4.

Det er utført en rekke undersøkelser som har inkludert flere institusjoner. Dette innebærer blant annet strukturgeologiske undersøkelser, geofysiske målinger, borehullslogging, kjerne-logging med mer. Arbeidet har resultert i mye kunnskap om området og en rekke publikasjoner i form av artikler, rapporter, doktorgradsavhandlinger og masteroppgaver.

Bergmassens egenskaper

I løpet av masteroppgaven ble det gjennomført laboratorieforsøk for å teste bergmassens egenskaper. Dette kapitlet tar derfor for seg grunnleggende teori om bergmekaniske og ingeniørgeologiske forhold som er viktige for den videre vurderingen av laboratorieresultatene. Ettersom det er mange faktorer som påvirker bergmassens egenskaper, er det valgt å fokusere på de forholdene som anses som viktigst med tanke på det videre arbeidet. Teorien bidrar som et viktig grunnlag for den videre undersøkelsen av bergmassen, laboratorieundersøkelser og analyse av parameterne.

3.1 Bergmassens styrke og deformasjon

Den vanligste parameteren for å karakterisere bergartens styrke er enaksiell trykkfasthet (σ_c) som kan finnes ved enaksialforsøk (Myrvang, 2001). Trykkfastheten finnes ved å laste sylindriske kjerner langs lengdeaksen til prøven går i brudd. Videre beregnes trykkfastheten som lasten ved brudd (P) fordelt på kjernens tverrsnittareal (A), som gitt i ligning (3.1) (Myrvang, 2001),

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{hvor} \quad A = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3.1)$$

og d er kjernens diameter.

Underveis i trykkforsøket registreres både spenningen og tøyningen i prøvestykket. Dette plottes i et spenning-tøyningsdiagram der E-modulus (E) og Poissons forhold (ν) bestemmes ut fra ligning (3.2) og (3.3). E-modulen er spesifikk for hvert enkelt materiale og beskriver materialets elastiske deformasjonsegenskaper (Myrvang, 2001). I bergmekanikken registreres kompresjon som positivt og utvidelse som negativt. Når en bergartsprøve blir trykksatt aksielt

vil den også få en radiell utvidelse. Tøyningen som oppstår er materialavhengig og beskrives av Poissons forhold angitt som forholdet mellom aksiell og radiell tøyning (Myrvang, 2001).

$$E = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\epsilon_a}, \quad (3.2) \quad \nu = -\frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta\epsilon_a}, \quad (3.3)$$

hvor σ_a er aksiell spenning, ϵ_a er aksiell tøyning og ϵ_r er radiell tøyning (ISRM, 1979). Andre metoder for å bestemme bergartens styrke er treaksialtesting og punktlasttest (Nilsen og Palmstrøm, 2000).

Til en viss grad kan trykkfastheten bedømmes visuelt. For eksempel vil en finkornet bergart være sterkere enn en grovkornet gitt den samme mineralsammensetning. I tillegg vil glatte mineraler som glimmer og kloritt ha stor innvirkning. Om bergarten ikke er isotrop kan styrken påvirkes av foliasjon, diskontinuiteter og andre inhomogeniteter (Myrvang, 2001).

En bergmasse består av deler av intakt berg som separeres av geologiske diskontinuiteter (Bieniawski, 1989). Derfor vil egenskapene til bergmassen både være avhengig av egenskapene til intakt berg og diskontinuitetene som skiller de. Siden bergmassen består av både intakt berg og geologiske strukturer som sprekker, folder og forkastninger er det viktig å skille mellom *bergart* og *bergmasse*, og huske at bergmassen kan ha helt andre mekaniske egenskaper enn bergarten (Nilsen og Thidemann, 1993).

3.2 Bruddkriterier

Ved å benytte ulike bruddkriterier kan det antas når bergartens styrke overskrides og brudd inntreffer. Flere slike bruddkriterier har blitt utviklet, og i denne oppgaven vil Mohr-Coulomb- og Hoek-Brown-kriteriet bli benyttet. Mohr-Coulomb er et lineært bruddkriterium, mens Hoek-Brown er et ikke-lineært empirisk bruddkriterium som baserer seg på prøvedata. Begge kriteriene benytter data fra treaksialforsøk som forklares nærmere i kapittel 9.

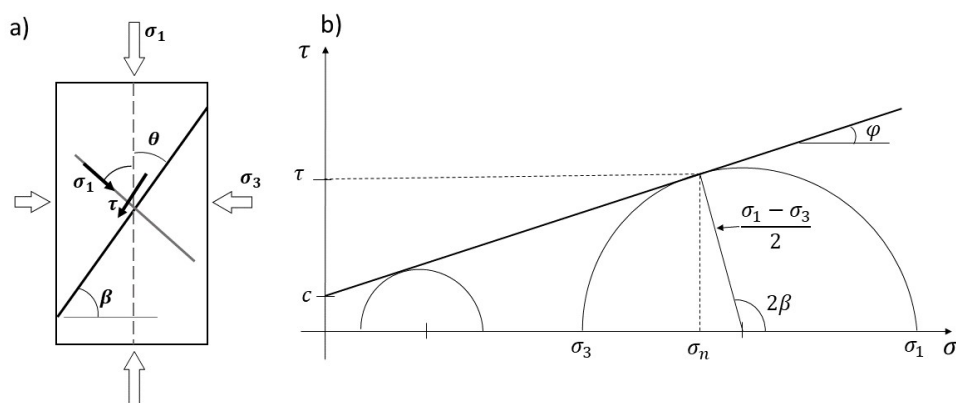
3.2.1 Mohr-Coulomb-kriteriet

Ved treaksialtesting ser man på styrken til bergarten ved ulike omslutningstrykk. Dette er illustrert i figur 3.1a, der en bergartsprøve får spenningspåkjenning fra σ_1 og σ_3 . Det oppstår en skjærspenning (τ) langs bruddplanet som har en vinkel θ til kjernens lengdeakse. Trykklasten (σ_1) og omslutningstrykket (σ_3) ved brudd presenteres av en Mohr-sirkel i et $\sigma - \tau$ -diagram som vist i figur 3.1b (Li, 2017). Flere tester under ulike omslutningstrykk vil danne flere Mohr-sirkler. Kurven som omslutter sirklene representerer bergartsstyrken og kalles bruddkurven. Denne er vanligvis ikke lineær, men kan ved lave omslutningstrykk presenteres av det lineære Mohr-Coulomb-kriteriet gitt i ligning (3.4) (Li, 2017),

$$\tau = c + \sigma_n \tan\phi, \quad (3.4)$$

der skjærstyrken (τ) ved normalspenningen (σ_n), er gitt som en funksjon av kohesjonen (c) og den indre friksjonsvinkelen (ϕ). Kohesjonen er den rene skjærstyrken til materialet når man ikke tilfører omslutningstrykk. Friksjonsvinkelen relateres til orienteringen til bruddplanet som bestemmes av bruddvinkelen gitt ved enten θ eller β , se figur 3.1a (Li, 2017). Bruddvinkelen kan måles manuelt eller beregnes ved å benytte ligning (3.5) og (3.6).

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (3.5) \quad \theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (3.6)$$



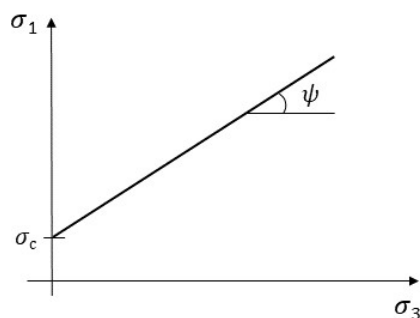
Figur 3.1: Komponenter og bruddkurve. Modifisert etter (Li, 2017).

τ og σ_n kan uttrykkes som funksjon av hovedspenningene, σ_1 og σ_3 . Mohr-Coulomb-kriteriet blir da uttrykt ved σ_1 og σ_3 , som er verdier man får fra laboratorieforsøk, se figur 3.2. En forenkling av denne ligningen er gitt i ligning (3.7) (Li, 2017),

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + 2c\sqrt{k} \quad (3.7)$$

der k er gitt som:

$$k = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) = \tan\psi \quad (3.8)$$



Figur 3.2: Mohr-Coulomb-kriteriet uttrykt ved σ_1 og σ_3 . Modifisert etter (Li, 2017).

3.2.2 Hoek-Brown-kriteriet

Hoek og Brown (1980) har utviklet en metode for å estimere styrken til oppsprukket bergmasse som baserer seg på blokkenes sammenkobling og overflatene mellom disse blokkene. Metoden har senere blitt modifisert og videreutviklet gjentatte ganger (Hoek, 2000). Hoek *et al.* (2002) presenterer det generaliserte Hoek-Brown-kriteriet som,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.9)$$

hvor σ_1 og σ_3 representerer største og minste hovedspenning ved brudd. σ_{ci} er den enaksiale trykkfastheten for intakt berg. m_b er bergmassens Hoek-Brown konstant og s og a er konstanter som er avhengig av bergmassekarakteristikken. For intakt berg er $s=1$ og $a=0.5$. For å benytte Hoek-Brown kriteriet må tre parametere bestemmes (Hoek, 2000):

- Enaksiell kompresjonsstyrke σ_{ci} for intakt berg,
- Hoek-Brown konstanten m_i for intakt berg og
- GSI verdien for bergmassen.

Parameterne kan enten estimeres ut fra eksisterende tabeller eller finnes ved treaksiell testing. Kalkulasjoner og bearbeiding av laboratoriedata knyttet til Hoek-Brown-kriteriet gjennomføres i denne oppgaven i programmet RocData (RocScience Inc., 2017). Teorien bak de viktigste parameterne og valg av inputparametere blir gitt videre i dette kapitlet. Om laboratoriedata ikke er tilgjengelig kan også m_i og σ_{ci} estimeres ut fra tabellverdier.

Ved laboratorietesting benyttes kjerneprøver. Disse regnes som intakt berg og ligning (3.9) forenkles til:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (3.10)$$

Her er forholdet mellom hovedspenningene definert av konstantene σ_{ci} og m_i . Disse verdiene kan finnes ved å gjøre treaksiell testing på kjerneprøver. Hvordan den treaksiale testingen utføres presenteres i kapittel 8 som en del av det utførte laboratoriearbeidet. Materialkonstantene m_b , s og a er definert av Hoek *et al.* (2002):

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (3.11)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (3.12)$$

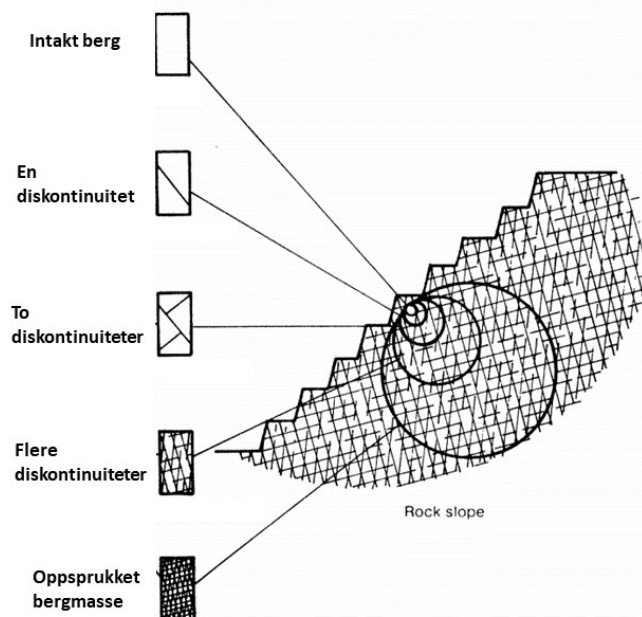
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right) \quad (3.13)$$

D (*disturbance factor*) tar hensyn til forstyrrelsen ved sprengning og spenningsavlastning. Siden Åkneset er en uberørt fjellside med in-situ bergmasse vil denne faktoren være 0.

GSI (Geological strength index) som klassifikasjonssystem benyttes til å bestemme parameterne i Hoek-Brown-kriteriet. Systemet estimerer reduksjonen i bergmassens styrke som funksjon av ulike geologiske forhold. Hvordan bergmassen karakteriseres baserer seg fullt og helt på observasjoner av bergmassens oppsprekking og forholdene på sprekkenes overflate (Nilsen og Palmstrøm, 2000). Disse to kombinasjonene gir utgangspunktet for å beskrive en rekke ulike bergmasser. Skjema for avlesning av GSI verdien finnes i vedlegg A. Systemet gir verdier mellom 0 og 100, der 100 er definert som den beste bergmassekvaliteten. Det vil si intakt berg med ru og uforvitrede sprekkflater.

Antagelser og begrensninger

Hoek-Brown-kriteriet må brukes med forsiktighet. Det er viktig å være klar over at kriteriet ikke medregner anisotropi eller påvirkningen av den mellomste hovedspenningen (σ_2), noe som kan være betydningsfulle faktorer i en oppsprukken bergmasse (Li, 2017). Siden Hoek-Brown-kriteriet antar isotrop bergmasse er det viktig at kriteriet benyttes på bergmasser med tilstrekkelig antall sprekkesett og med lignende sprekkarakteristikk (Hoek, 2000). Det antas at når man håndterer bergmasser i stor skala, vil styrken til bergmassen nå en konstant verdi når størrelsen på de individuelle bergartsfragmentene er små nok i forhold til størrelsen på strukturen som vurderes. Dette er illustrert i figur 3.3. Figuren viser overgangen fra en isotrop og intakt bergartsprøve, så til en anisotrop bergmasse kontrollert av en eller to diskontinuiteter, for så til en høyt oppsprukket isotrop bergmasse (Hoek, 2000). Som tidligere nevnt, er det viktig å skille mellom intakt berg og bergmassen som helhet.



Figur 3.3: Valgt skala påvirker bergmassens egenskaper. Her vises overgangen fra intakt berg til sterkt oppsprukket bergmasse med økende prøvestørrelse. Modifisert av forfatter etter (Hoek, 1983).

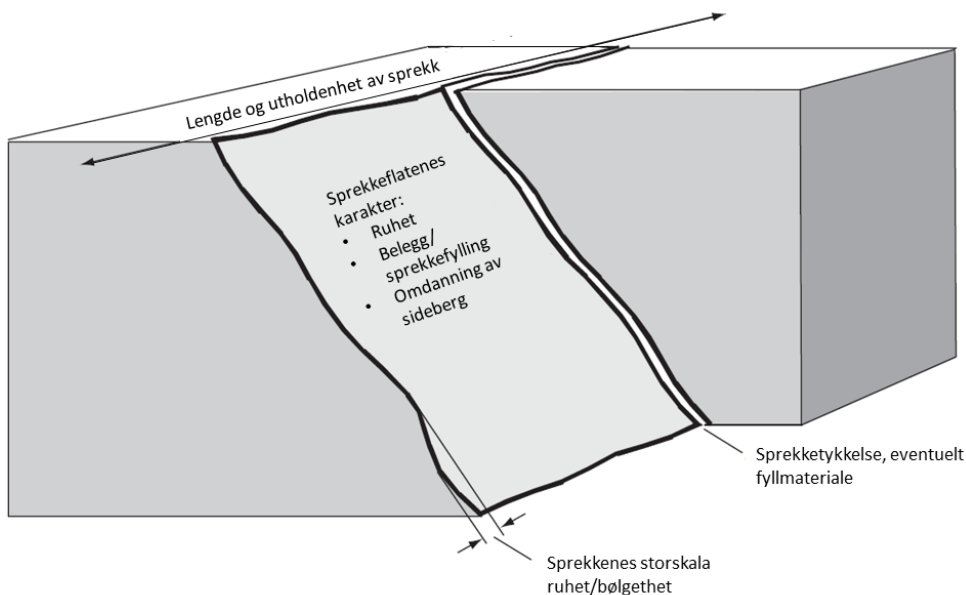
3.3 Diskontinuiteter

Diskontinuiteter er strukturer eller geologiske egenskaper som endrer homogeniteten til bergmassen, og er et samlebegrep for alle typer sprekker, svakhetsplan, skifrige plan, foliasjon, forkastninger og svakhetssoner (Nilsen og Palmstrøm, 2000). Diskontinuiteter skapes som regel av tektoniske bevegelser i jordskorpa. Påvirkningen diskontinuiteter har på bergmassens oppførsel er viktig ved karakterisering av bergmasser, fordi ulike diskontinuiteter vil ha ulik ingeniørgeologisk betydning. Ruhet, sprekkekontakt, forvitring, fyllmateriale og følsomheten for grunnvannstrømning vil variere stort for de ulike diskontinuitetene (Palmstrøm og Stille, 2015).

3.3.1 Sprekker i bergmassen

I følge Nilsen og Palmstrøm (2000) er en sprekke en tredimensjonal diskontinuitet sammensatt av sprekkeflater. Hovedkarakteristikkene er ruhet, forholdene på sprekkeflatene, fyllmateriale og lengden og utholdenheten til sprekkene, se figur 3.4. Dette påvirker skjærstyrken til sprekkene og vannstrømningen gjennom bergmassen (Palmstrøm og Stille, 2015).

Å karakterisere sprekker er en viktig del av kjerneloggingen. Hvordan ruhet, sprekkefylling og oppsprekkingsgrad registreres ved kjernelogging forklares mer utdypende i kapittel 4.



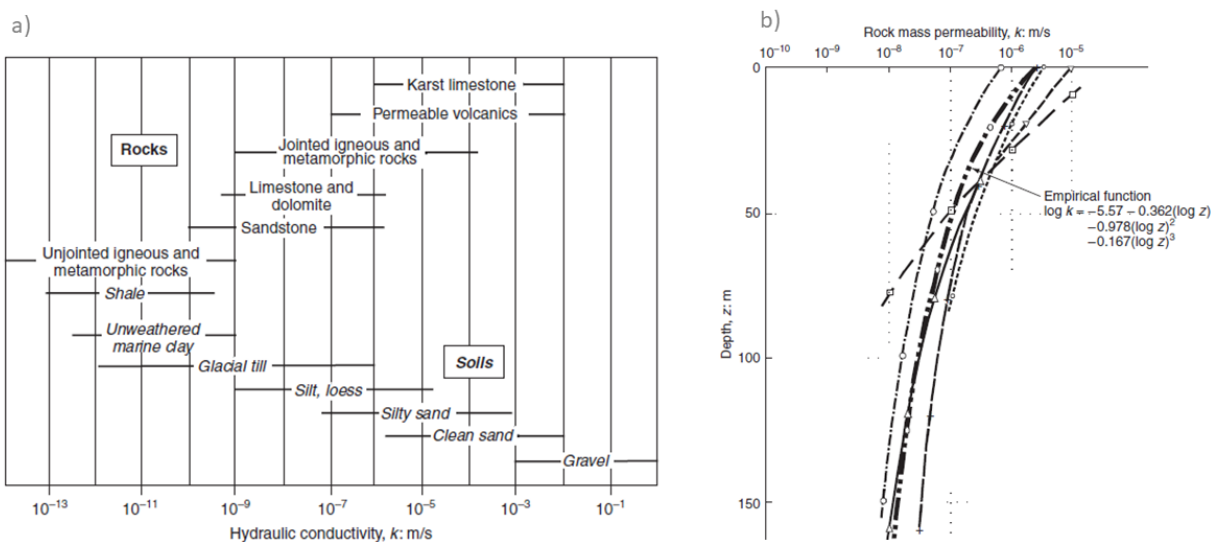
Figur 3.4: Viktige egenskaper ved karakterisering av sprekker. Modifisert av forfatter etter (Palmstrøm og Stille, 2015)

3.4 Grunnvannets påvirkning

Grunnvann er det vannet som fritt beveger seg under grunnvannsspeilet, som er det nivået der bergmassen under er fullstendig vannmettet (Palmström og Stille, 2015). Grunnvannet kan bevege seg over store distanser i bergmassen. Når man skal analysere hvilke problemer som kan oppstå er det derfor viktig å vite noe om grunnvannsstrømningen (Palmström og Stille, 2015).

3.4.1 Hydraulisk konduktivitet i bergmassen

Berg har ofte en lav effektiv porøsitet og permeabilitet på grunn av dårlig kontakt mellom porene i berget. Derfor er det ofte sprekker og svakhetssoner som bidrar mest til grunnvannsstrømningen, med unntak av høy-porøse bergarter som sandstein og enkelte vulkanske bergarter (Palmström og Stille, 2015). Den hydrauliske konduktiviteten (k), også kalt permeabilitetskoeffisienten, brukes ofte for å karakterisere hydrogeologiske forhold (Palmström og Stille, 2015). Typiske verdier for hydraulisk konduktivitet for bergmasser og løsmasser er gitt i figur 3.9a. Den hydrauliske konduktiviteten er gitt i m/s og er avhengig av både væsken og bergmassens egenskaper (Nilsen og Palmström, 2000). På grunn av variasjon i graden oppsprekking vil bergmassen være inhomogen og anisotrop også med tanke på konduktiviteten (Palmström og Stille, 2015). Generelt avtar konduktiviteten mot dypet som følge av lavere sprekkeåpninger og en økning i sprekkeavstand, se figur 3.5b.



Figur 3.5: a) Typiske verdier for hydraulisk konduktivitet til berg og løsmasser. b) Hydraulisk konduktivitet avtar mot dypet. Testen er utført i Sverige på prekambrisk berg. Modifisert av forfatter etter (Palmström og Stille, 2015).

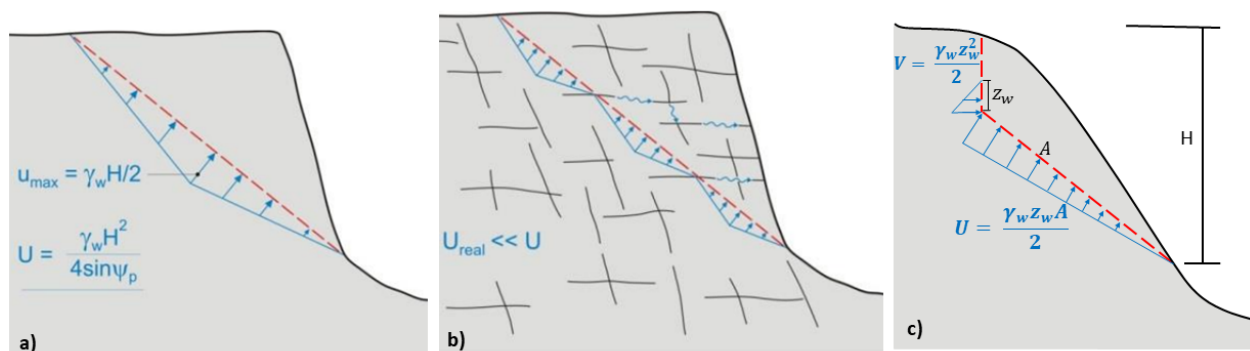
3.4.2 Effekten på bergmassestyrken

Vann reagerer med mineraler i bergmassen både kjemisk og fysisk og kan resultere i forvitring eller endring i volumet av mineraler (Palmström og Stille, 2015). I de fleste tilfeller er det effekten av pore og sprekketrykk som utgjør den største påvirkningen på bergmassestyrken (Goodman, 1989). Om man hindrer drenering under lasttilføring vil porene og sprekkene kompaktere, noe som resulterer i et økt poretrykk. I følge Nilsen og Palmström (2000) har vann en betydelig effekt på bergmassestyrken og kan redusere styrken med opptil 40-60% i forhold til tørre prøver.

3.4.3 Grunnvannstrykkets påvirkning på stabiliteten

Vanntrykket i en fjellside er en viktig faktor for stabiliteten (Blikra, 2017). Vanntrykket reduserer normalspenningen og friksjonen på glideplanet, mens vann i tensjonssprekker kan fungere som direkte drivende krefter (Nilsen og Palmström, 2000). Når de drivende kreftene blir større enn de stabiliserende kreftene får man en ustabilitet i fjellsiden. Vanntrykket kan reduseres ved å senke grunnvannsnivået.

Når man beregner grunnvannstrykket er det vanlig å være konservativ og anta at det hydrauliske trykket bygger seg opp langs glideplanet og er størst på midten, figur 3.6a. Dette representerer det verst tenkelige scenariet, men gir ikke et reelt bilde av situasjonen (Nilsen, 2017). I virkeligheten vil sprekker som krysser glideplanet føre med seg vann og gi en naturlig drenering, se figur 3.6b. Dette vil gjøre at det resulterende grunnvannstrykket reduseres betraktelig og gir et mer nøyaktig bilde av grunnvannstrykket (Nilsen, 2017). Ved kalkuleringer av «worst case» senario blir derfor modellen til venstre ofte brukt. Ved Åkneset, som har en definert baksprekk vil grunnvannstrykket bygge seg opp som vist i figur 3.6c. Vann som står i baksprekken vil påføre en horisontal kraft, mens grunnvannstrykket vil avta nedover i fjellsiden til det nivået der vannet dreneres ut.



Figur 3.6: a) Det mye brukte «worst case» scenariet for vanntrykket i en skråning. b) Et mer sannsynlig senario, med et virkelig vanntrykk $U_{real} < U$ (Nilsen, 2017). Vanntrykket ved tensjonssprekk fylt med vann. Modifisert av forfatter etter (Hoek, 2000).

3.5 Fjellskred

Dette delkapittelet er basert på prosjektoppgaven Tønset (2018) og vil kort definere fjellskred og årsaker til skred. For mer utdypende informasjon om fjellskred og de ulike bruddmekanismene henvises det til prosjektoppgaven.

3.5.1 Definisjoner og klassifisering

Skred klassifiseres vanligvis etter volum. Steinskred med volum større enn 100 000 m³ defineres som fjellskred (NGU *et al.*, 2016). Videre kategoriseres fjellskred etter volum og rekkevidde som vist i tabell 3.1 nedenfor. Åkneset har et antatt maksimalt volum på 54 millioner m³ og defineres derfor som et meget stort fjellskred.

Betegnelse	Volum	Rekkevidde
Små fjellskred	100 000 - 200 000 m ³	Litt lenger enn fallhøyden
Middles fjellskred	200 - 1 mill m ³	1.4 til 3 ganger fallhøyden
Store fjellskred	1 - 5 mill m ³	2 til 5 ganger fallhøyden
Meget store fjellskred	5 - 100 mill m ³	3 - 7 ganger fallhøyden

Tabell 3.1: Fjellskred kategorisert ut fra volum og rekkevidde (NGU *et al.*, 2016).

I følge Nilsen og Palmstrøm (2000) er det hovedsakelig orienteringen til sprekker, slepper og svakhetssoner i forhold til skråningshelningen som definerer det potensielle bruddet. Bruddmekanismene er avhengig av sprekkenes orientering og massenes volum. For mer informasjon om bruddmekanismer henvises det til prosjektoppgaven.

Åkneset er et komplekst og stort område, med partier som beveger seg med ulike hastigheter og i ulike retninger (Langeland, 2014). Dette gjør det vanskelig å klassifisere Åkneset etter enkle modeller for bruddmekanismer. Som det blir vist senere i oppgaven eksisterer flere glideplan som skredbevegelsen kan følge, i tillegg til at broer av intakt berg kan bidra til å holde partier sammen. Dette gjør utrasingen svært komplisert (Nilsen, 2016).

3.5.2 Årsaker

Skred kan forekomme både naturlig og som et resultat av menneskelig aktivitet. Sett bort fra arbeid i forbindelse med kjerneboringer og annen montering av utstyr er Åkneset uberørt. Derfor er der valgt å fokusere på de naturlige årsakene til at skred forekommer. Flere faktorer påvirker stabiliteten til et området. Langeland (2014) deler disse faktorene i tre grupper, geologiske, morfologiske og fysiske:

- *Geologiske faktorer:* Bergartstype og mekaniske egenskaper, strukturer, sprekker, svakhetssoner, foliasjon, skjærstyrke og oppsprekingsgrad.

- *Morfologiske faktorer:* Skråningstopografi, erosjonsprosesser, glasial avlastning og tektoniske forhold.
- *Fysiske faktorer:* Grunnvannstrykk som følge av nedbør og snøsmelting, frysing og tining, gravitasjon (kryp), in-situ spenningsforhold og seismisk aktivitet.

I følge Nilsen og Palmstrøm (2000) er sprekkenes orientering og karakteristikk, samt grunnvannet de viktigste faktorene. Sprekkene definerer mulige bruddplan, mens sprekkenes skjærstyrke sier noe om bruddmotstanden (Grøneng, 2010). Som tidligere nevnt har grunnvann en stor innvirkning på stabiliteten. Både ved at den reduserer normalspenningen og friksjonen på sprekker og glideplan, og ved at styrken til sprekkefyllinger blir redusert. Vann kan også skape svelleproblemer, erosjon og utvidelse på grunn av fryseprosesser (Wyllie og Mah, 2004).

Nytten av kjerneboring, kjernelogging og borehullslogging

Videre i oppgaven vil det bli benyttet både kjerne- og borehullsdata. Det kommende kapittelet omhandler derfor teori om kjerneboring og kjerne- og borehullslogging, og fungerer som et grunnlag for det utførte arbeidet. Kjerneboring er et nyttig supplement til overflatekartlegging. Kjerneprøver og borehullslogging gir informasjon om berggrunnen som ikke kan observeres på overflaten (Wyllie og Mah, 2004). Nilsen og Palmstrøm (2000) legger fram følgende formål med kjerneboring:

- Bekrefte den geologiske tolkingen.
- Skaffe mer informasjon om bergartsgrenser og forvitningsgrad.
- Skaffe informasjon om orientering og karakteristikken til sprekker og svakhetssoner.
- Studere grunnvannsforhold.
- Gjennomføre laboratorietester
- Utføre undersøkelser med instrumenter i selve borehullene.

4.1 Kjerneboring

Ved Åkneset er kjerneboringene utført av Geodrilling AS. Kjerneboring benyttes ofte ved prøveboringer, grunnundersøkelser og uthenting av borekjerner (Bruland, 2016). Da bores det ut hele kjerner fra bergmassen som kan undersøkes videre, samtidig som selve borehullet både kan undersøkes og instrumenteres. Dette gir supplerende informasjon til overflatekartleggingen og er nødvendig for å undersøke forholdene mot dypet.

Figur 4.1 viser et bilde av boreriggen ved borehull KH-01-17.



Figur 4.1: Boreriggen ved KH-01-17 sommeren 2017. Foto: Gustav Pless/NVE

Underveis i boringen utføres televier og vanntapsmålinger. I enkelte områder kan bergmassen være meget oppknust og ustabil. Dette gjør at borerne må støpe igjen borehullet for å stabilisere borhullsveggen før videre boring. Støpning av visse partier i borehullet vil gjøre at sprekker fylles med sement, noe som hindrer reelle vanntapsmålinger og televierbilder. Derfor er det viktig å kontinuerlig gjennomføre televier og vanntapsmålinger. Hvilke partier som støpes noteres i boreloggen.

Andre faktorer som er viktige under kjerneboring er tilføringen av vann. Dette gjøres for å avkjøle bittene og for å føre boreslammet opp til overflaten (Wyllie og Mah, 2004). Vannet kan føre til at sleppematerialer i sprekker vaskes ut under boring, og gjør det vanskelig å bestemme den virkelige sprekketykkelsen når kjernene logges i ettertid. Ved boring gjennom svakhetssoner kan det være nødvendig å redusere matetrykket og mengden vann for å få med mest mulig materiale opp og for å unngå kjernetap.

Et annet viktig moment ved boringen er håndtering av kjernene når de legges i kjerneborekassene. Borerne må gjerne slå litt for å få løs kjernene fra boreutstyret og for å tilpasse de til kjerneborekassene. Derfor kan flere av sprekkepartiene i kjernene både skyldes boreinduserte spenninger og den «menneskelige» håndteringen. Slike kunstige sprekker skal merkes av borerne, men det er ikke alltid lett å avgjøre om sprekker er kunstige. Dette kan føre til et mye høyere antall sprekker i kjerneloggen enn det som er reelt for bergmassen.

4.2 Kjernelogging

Kjerne som tas ut under boring plasseres i kjernebatter, som vist i figur 4.2. Deretter logges kjernene meter-for-meter. Ved kjerneloggingen blir det gjort en geologisk beskrivelse av bergmassen, samt registrering av kjernetap, knusningssoner, sprekkefrekvens og Q-metodeparameterne (RQD, Ja og Jr). Identifikasjon og beskrivelse av bergmassen er for de nyere hullene utført etter Internasjonal standard «ISO 14689» (ISO, 2017). Bestemmelse av Q-metodeparameterne er gjort etter NGIs håndbok «Bruk av Q-systemet» (NGI, 2015).

Senere i masteroppgaven blir områder med bevegelse og mulige glideplan identifisert. Da er det nyttig å kunne sammenligne med informasjon fra kjerneloggingen. Spesielt med tanke på oppsprekking, ruhet til sprekker, sprekkefyllinger og mineralinnhold, da dette er informasjon som kan indikere om området har redusert friksjon.



Figur 4.2: Eksempel på hvordan kjernene er plassert i kjernebatter. Hver lengde er én meter lang. Slik logges de meter for meter. Bilde fra NVEs ftp server (NVE, 2019).

4.2.1 Parametrene som registreres ved kjernelogging

Når deler av kjernen mangler har man det som kalles *kjernetap*. Dette blir avmerket av borerne i kjernebatterne. Kjernetap kan skyldes store sprekkesoner eller at løst og finkornet materiale skyldes ut under boringen. *Sprekkefrekvens* (S/m) er antall brudd per meter kjerne. Dette inkluderer *knusningssoner*, som er partier der berget er fullstendig oppknust. En høy sprekkefrekvens indikerer dårlig bergmasse, mens en lav indikerer god bergmasse. *RQD* (*Rock quality designation*) relateres også til kjernens oppsprekking. Her registreres alle kjernebiter over 10 cm. Disse delene legges sammen, og presenteres som en prosentandel av kjernens totale lengde. En høy RQD indikerer derfor en god bergmasse, mens en lav indikerer en dårligere bergmassekvalitet. Det er valgt å klassifisere RQD og sprekkefrekvens etter henholdsvis NGI (2015) og Aardal (2007), se tabell 4.1 og 4.2.

Tabell 4.1: Klassifikasjon av bergmassekvalitet basert på RQD (NGI, 2015)

RQD	Bergmasse klassifikasjon
0-25	Svært dårlig
25-50	Dårlig
50-75	Middels
75-90	God
90-100	Utmerket

Tabell 4.2: Klassifikasjon av sprekkefrekvens per meter (Aardal, 2007).

Sprekkefrekvens S/m	Beskrivelse av sprekkefrekvensen
0-1	Veldig lav
1-3	Lav
3-10	Moderat høy
10-30	Høy
30-100	Veldig høy

Parameterne som sier noe om sprekkenes egenskaper, J_a og J_r , er viktige med tanke på vannstrømningen i berg. Dette er fordi vannstrømningen i bergarter med lav porøsitet skjer gjennom åpne sprekker. Tall for *sprekkefylling* (J_a) sier noe om mineral/leirbelegget på sprekken og har betydning for både friksjon og vannstrømning. Mineralfyllingen har stor innvirkning på hvor mye vann som kan strømme gjennom sprekken. Et tett leirmateriale vil være impermeabelt og tillate lav strømning gjennom bergmassen mens et permeabelt lag vil tillate større strømning. Samtidig kan leirmateriale bidra til mindre friksjon langs sprekken. *Sprekkeruhetstall* (J_r) sier noe om friksjonen langs en sprekke og er avhengig av sprekkeflatens karakter, bølgete, ru, plan eller glatt, og om det er bergkontakt (NGI, 2015). Dette er viktige parametre med tanke på stabiliteten. En beskrivelse av J_a og J_r verdiene finnes i vedlegg B.

4.3 Borehullslogging

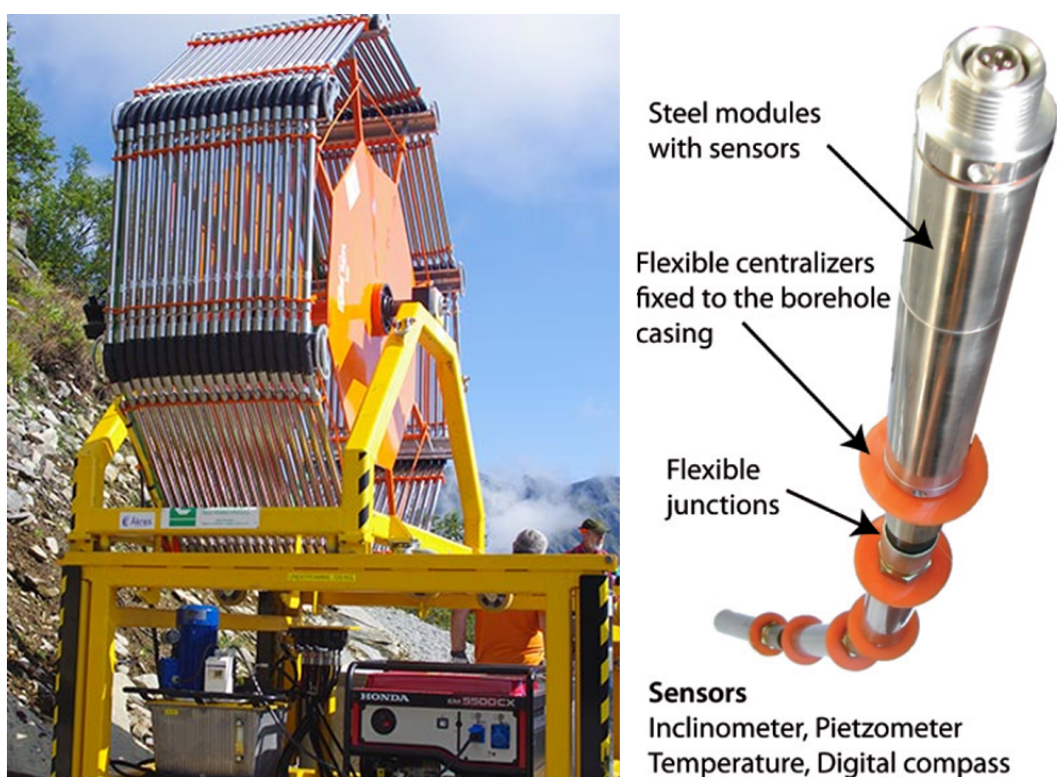
Etter boringen kan selve borehullet undersøkes videre. Da benyttes blant annet geofysiske metoder, temperaturmålinger, vanntapsmålinger, televierer og DMS. Videre i oppgaven blir det benyttet data fra DMS installert i enkelte av borehullene og televiererdata. Disse metodene blir nærmere forklart i det følgende delkapitlet.

4.3.1 DMS - differential monitoring of stability

DMS(Differential monitoring of Stability)-systemet er produsert av C.S.G Srl. Overvåknings-systemet er laget for å automatisk, kontinuerlig og i sanntid overvåke skråningsstabilitet

og annet anleggsarbeid (CSG Srl, 2019). Systemet består av et overvåkningsinstrument (DMS-kolonne) som installeres i borehullet eller på overflaten, en transmisjonsenhet og en programvare for styring, datainnsamling og prosessering av data (CSG Srl, 2019).

DMS kolonnen består av sensorer som er koblet sammen med spesielle ledd, se figur 4.3. Disse sensorene har mulighet til å bevege seg (deformere) sammen med berggrunnen. Leddene tillater en viss bevegelse som gjør at instrumentene kan tilpasse seg berggrunnsbevegelsen i det aktuelle området, både forflytning og retning. I tillegg kan man få informasjon om vannspeilet, temperatur og akselerasjon, og hvordan dette varierer over tid (CSG Srl, 2019). Kolonnene ved Åkneset er tilsammen mellom 100-150 meter lang, og hver kolonnedel er en meter lang (Langeland, 2014). Disse kolonnene inneholder inklinometer og piezometer og gir målinger av 2D bevegelse, vanntrykk og temperatur (Langeland, 2014).

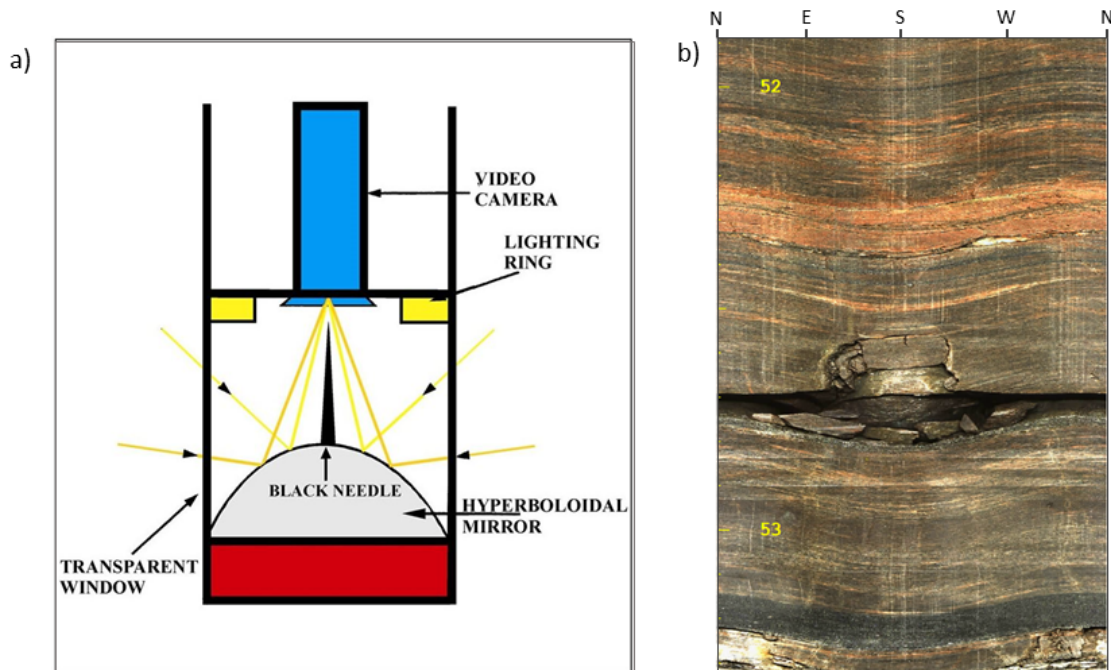


Figur 4.3: Til venstre vises en DMS kolonne som skal heises ned i borehullet (CSG Srl, 2019). Figuren til høyre viser sensoren med inklinometer, piezometer, temperatur og kompass (Blikra *et al.*, 2013).

4.3.2 Televiever

Ved bruk av optisk televiever (OPTV) får man et orientert bilde av innsiden av borehullet. Den optiske televiever består av en sonde med et digitalt kamera som filmer mot et hyperbolsk speil som vist i figur 4.4a. Sonden senkes ned i borehullet med en hastighet på 1 meter per minutt og gjør en registrering per millimeter (NGU, 2015a).

Sonden har et trekomponent magnetometer og tre akselerometre som orienterer bildet. På den måten kan strøk, fall og tykkelse av sprekker og foliasjon beregnes (NGU, 2015a). Når dataene videre skal analysere brettes televiverbildet ut som vist i figur 4.4b.



Figur 4.4: (a) Ved bruk av optisk televiver filmer et digitalt kamera mot et hyperbolsk speil (NGU, 2015a). (b) Dette gir et orientert bilde av borehullsveggen NVE (2019).

Dette gir god informasjon om geologien mot dypet og er et nyttig supplement til kjerne loggingen. Spesielt nyttig er det med informasjon om bergartsgrenser, svakhetssoner og strøk og fall for sprekker og foliasjon. I de tilfeller der det ikke er mulig å beholde kjernen på grunn av for stor oppknusing eller store sprekker er det også gunstig med informasjon fra televiver (Langeland, 2014).

Videre skal denne informasjonen brukes til å verifisere kjerne loggingen, og bidra til å detektere glideplanene.

Kapittel 5

Momenter fra prosjektoppgaven

Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven «*Åknes skredområde- sammenstilling og diskusjon av informasjon fra kjerneboring*» skrevet av undertegnede høsten 2018 (Tønset, 2018). Målet med prosjektoppgaven var å sette seg inn i hva som tidligere er blitt utført av undersøkelser ved Åkneset, spesielt med tanke på kjerneboringer, samt å sammenstille og vurdere data fra de nye kjerneboringshullene fra 2017.

Dette kapitlet baserer seg på de viktigste momentene fra prosjektoppgaven. Det blir gitt en sammenstillingen av informasjon fra kjerneloggingen av borehullene fra 2017. Deretter presenteres tegnede profiler og vurderinger rundt feilkilder, verdien av kjerneloggingen og profilene. For mer informasjon om grunnleggende teori og annen informasjon fra prosjektoppgaven henvises det til Tønset (2018).

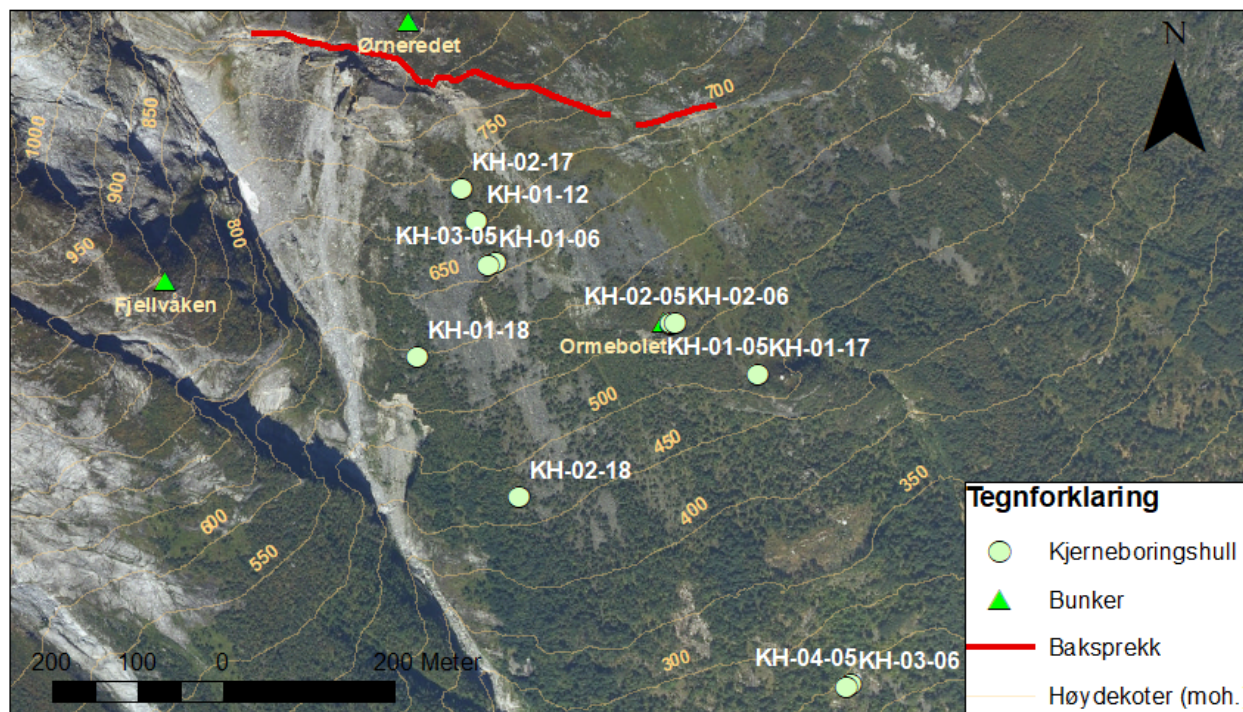
5.1 Oversikt over kjerneboringer ved Åkneset

12 kjerneboringshull er boret ved Åkneset. Informasjon om borehullenes navn, årstall, fall, diameter og koordinater finnes i tabell 5.1, mens lokasjonen er vist i figur 5.1. Som nevnt i kapittel 1.3 er alle kart som presenteres i denne oppgaven laget i AutoCad, med kartgrunnlag hentet fra Kartverket, NGU og NVE (NVE, 2019).

Som nevnt i kapittel 4 er kjerneboringene ved Åkneset utført for å kunne undersøke berggrunnen under overflaten. Dette gjør det mulig å blant annet se på sprekkefrekvens, svakhetssoner og bergartstyper. I tillegg benyttes selve borehullet til geofysiske tester og overvåking av vann og bevegelse ved hjelp av DMS.

Tabell 5.1: Borehullenes navn, årstall boret, fall, dyp, diameter og koordinater (Elvebakk, 2008, 2013, Elvebakk og Pless, 2018, NVE, 2019).

Brønn nr	Navn	Boret År	Fall [deg]	Dybde [m]	Diameter [mm]	UTM Øst	UTM Nord	Høyde [moh]
KH-02-18	Tåa	2018	90	200	96	395436.7	6895530.2	482
KH-01-18	Rennekanten	2018	90	221	96	395318.5	6895693.7	592,9
KH-02-17	Tredje Øvre	2017	90	300	96	395369.7	6895890.3	733.7
KH-01-17	Kulen	2017	90	304	96	395716.4	6895672.0	506.8
KH-01-12	Nye Øvre	2012	90	200	98	395387.1	6895851.7	735
KH-03-06	Nedre	2006	90	198	76	395820.1	6895308.2	236.0
KH-02-06	Midtre	2006	90	202	76	395620.4	6895733.4	565,0
KH-01-06	Øvre	2006	90	201	76	395400.3	6895799.4	658,3
KH-04-05	Nedre	2005	90	151	56	395824.5	6895311.0	236,0
KH-03-05	Øvre	2005	90	162	56	395410,0	6895804,0	658,0
KH-02-05	Midtre 60 °	2005	60	150	56	395613.9	6895732.9	565
KH-01-05	Midtre 90 °	2005	90	150		395614.2	6895732.1	561.9



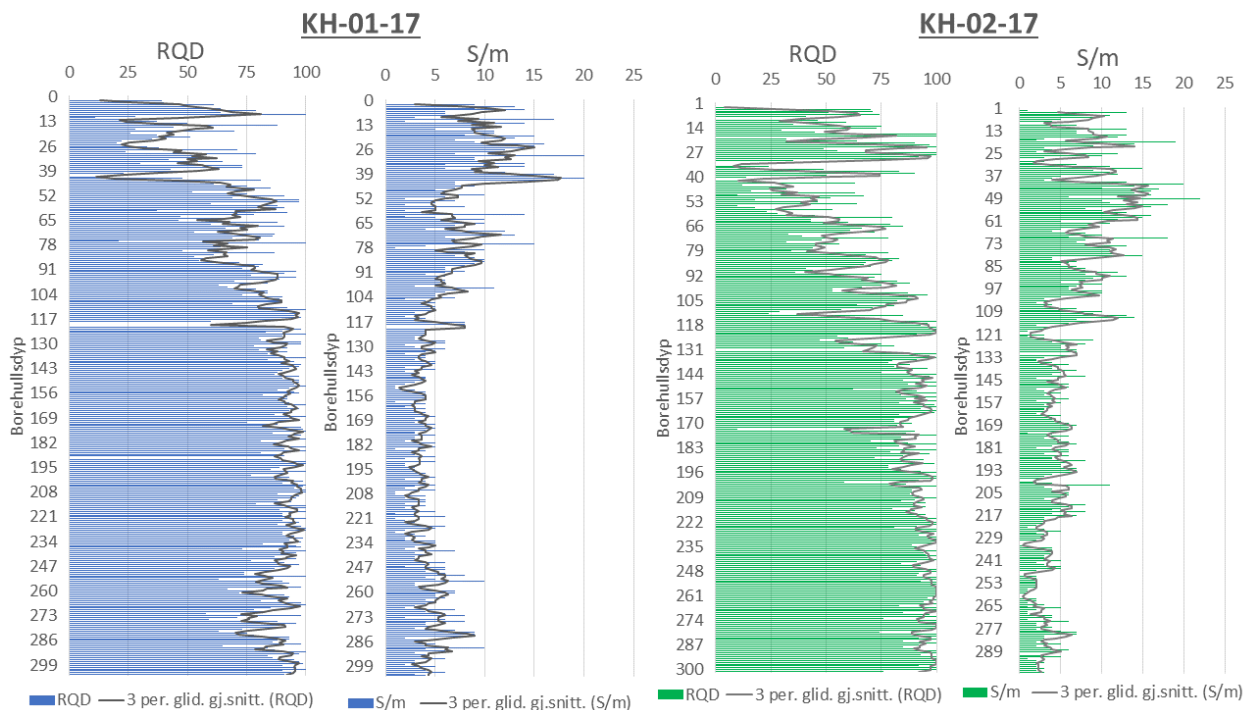
Figur 5.1: Åknes skredområde med lokasjonen til de tolv borehullene indikert.

5.1.1 Kjernelegging

I 2017 og 2018 ble det boret fire nye kjerneboringshull. Kjernene fra 2017 og 2018 ble logget, og dataene fra de to boringene gjort i 2017 ble analysert som en del av prosjektoppgaven.

Selve kjerneleggingen ble utført etter Internasjonal standard ISO 14689 «Geotechnical investigation and testing- Identification, description and classification of rock» (ISO, 2017). Da klassifiseres bergmassen etter farge, kornstørrelse og mineralinnhold. Spesielt borehull KH-01-17 viste to tydelige bergarter, en lys og grovkornet og en mørk og finkornet bergart. Videre ble NGIs håndbok «Bruk av Q-metoden» (NGI, 2015) brukt til å beskrive sprekke- og sprekkeegenskapene.

Under analysering av kjernene ble det spesielt lagt vekt på bergmassens sprekkefrekvens og RQD, indikert i figur 5.2 for borehull KH-01-17 og KH-02-17. Begge borehullene har en lav RQD og en høy sprekkefrekvens i de øvre delene av borehullet, ved omtrent 0-60 meters dyp. Videre nedover blir oppsprekningen mindre, og fra omtrent 100 meters dyp antas massiv bergmasse.



Figur 5.2: Figuren illustrerer RQD og sprekkefrekvens registrert ved kjernelegging for KH-01-17 og KH-02-17 (NVE, 2019).

Bestemme bergmassekvalitet ut fra RQD og sprekkefrekvens

Det er flere faktorer som påvirker bergmassekvaliteten, og en av disse er graden av oppsprekking. For å vurdere RQD og sprekkefrekvens i forhold til bergmassekvalitet er det valgt å klassifisere

etter tabell 4.1 og tabell 4.2.

Klassifisering av RQD og sprekkefrekvens ga en tanke om kvaliteten på bergmassen nedover i borehullet og ga grunnlaget for å tegne opp profiler. Selv om graden av oppsprekking forandrer seg og veksler nedover i borehullet er det likevel valgt å sette omtrentlige grenser som deler bergmassen opp i god, middels og dårlig bergmasse.

5.2 Sammenstilling og vurdering av data fra borehull

5.2.1 Utarbeidelse av profiler

Ut fra borehullsplasseringene ble det valgt å trekke fire profillinjer, se figur 5.3. Profilene ble tegnet slik at de dekket de fleste borehullsplasseringene. Profil A-A' og B-B' ble trukket gjennom de to nye borehullene fra 2017 for å kunne benytte informasjon fra analysen av kjerneloggingen utført tidligere i prosjektoppgaven. Profil C-C' og D-D går gjennom borehullene fra 2018. Disse var ikke ferdig logget ved prosjektoppgavens slutt, og det ble derfor valgt å kun fokusere på profil A-A' og B-B'.

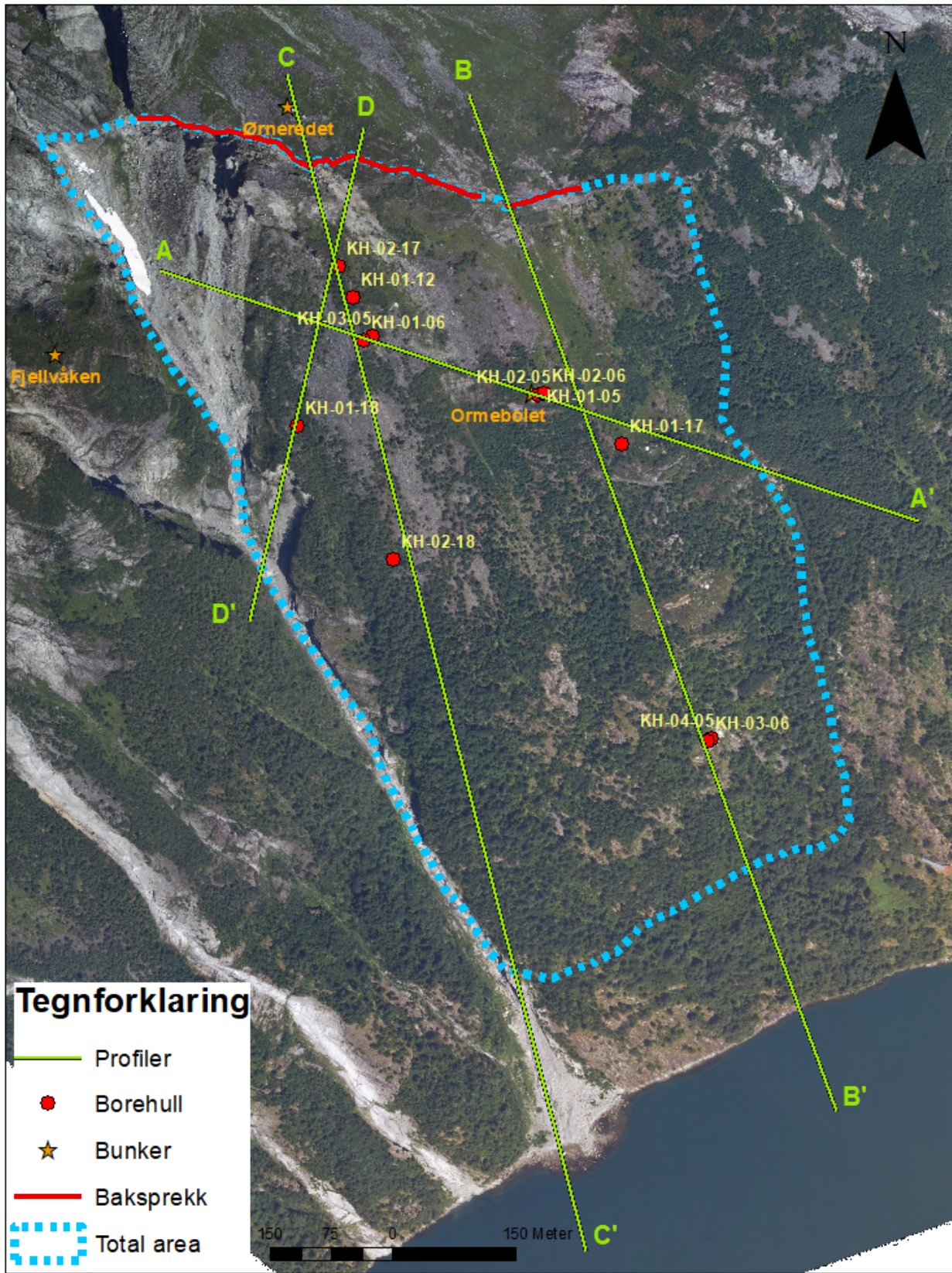
Profilene ble laget ved å hente høydedata fra NVEs ArcGis-modell og overføre disse til AutoCAD. Her ble borehullene tegnet inn. Profilene ble delt inn i geologiske enheter etter oppsprekkingen. Som nevnt ovenfor ble RQD og sprekkefrekvens brukt til å dele inn i god, middels og dårlig bergmasse, se tabell 5.2. Dette fordi bergets styrke kan sees i sammenheng med oppsprekkingsgraden.

Tabell 5.2: Valg av enheter basert på bergmassekvalitet

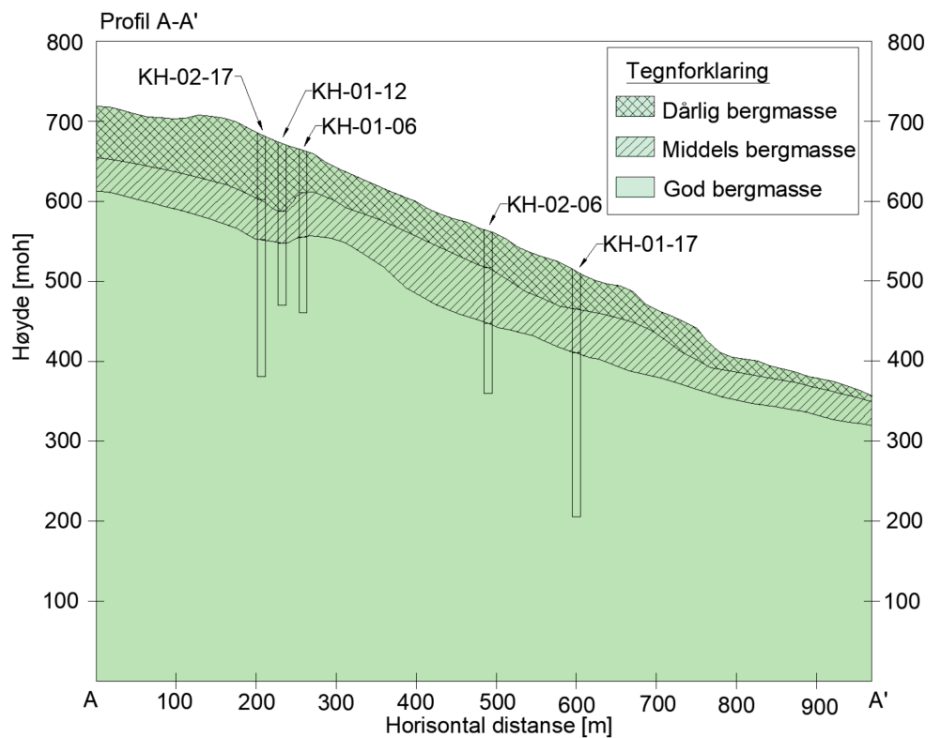
Bergmassekvalitet	RQD	Sprekkefrekvens(S/m)
Dårlig bergmasse	< 50	> 10
Middels bergmasse	50 - 70	10 - 3
God bergmasse	> 75	< 3

Som datagrunnlag ble kjerneloggingen av de nye borehullene fra 2017 brukt, samt informasjon fra tidligere kjernelogginger. Denne informasjonen er hentet fra NGU sine rapporter Ganerød (2013) og Ganerød *et al.* (2007).

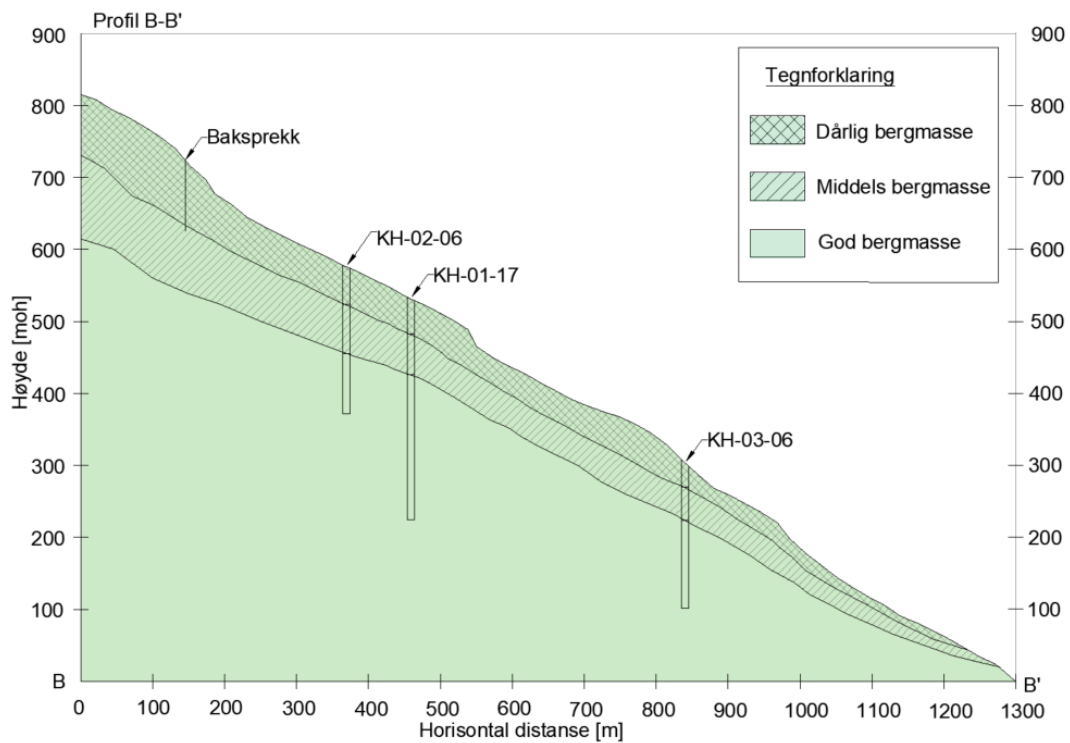
Ut fra korrelasjonen mellom RQD, sprekkefrekvens og bergmassekvalitet presentert i tabell 4.1 og tabell 4.2 i forrige kapittel ble bergmassekvaliteten tegnet opp i borehullene. Dette gjorde det mulig å se sammenhenger og trekke linjer mellom tilsvarende bergmassekvaliteter i borehullene. En tolkning av hvordan bergmassekvaliteten forandrer seg for hele profilet ble gjort og resultatet kan man se i figur 5.4 og 5.5.



Figur 5.3: Ut fra borehullsplasseringene er det valgt å trekke fire profiler.



Figur 5.4: Tolkning av profil AA'1



Figur 5.5: Tolkning av profil B-B'

5.2.2 Vurdering av profiler og borehullsdata

Grensene mellom god, middels og dårlig bergmassekvalitet er satt etter tabell 5.2. Det er likevel viktig å være klar over at overgangen mellom høy og lav oppsprekking er vekselvis og gradvis, og at det i virkeligheten ikke finnes skarpe skiller mellom godt og dårlig berg. Hva som til syvende og sist defineres som godt og dårlig berg baserer seg på en subjektiv vurdering av bergmassen. Her er det som nevnt valgt å ta utgangspunkt i tabell 4.1 og 4.2 der RQD og sprekkefrekvens klassifiseres.

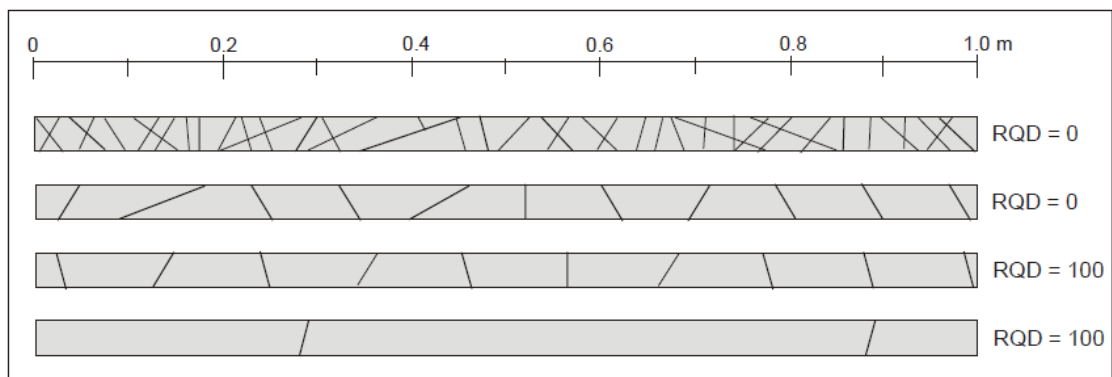
Et annet spørsmål er om det blir riktig å gi en vurdering av bergmassen kun ut fra RQD og sprekkefrekvens i og med at det er mange andre faktorer som spiller inn. Siden høy oppsprekking kan indikere svakere bergmasse er det valgt å bruke RQD og sprekkefrekvens som utgangspunkt for videre vurdering av bergmassen.

Som vist i figur 5.4 og 5.5 er det trukket linjer mellom borehullene for å gi en indikasjon på forholdene langs hele profilet. Profilene reflekterer borehullene, med dårlig bergmassekvalitet de øverste meterne før det kommer et lag med middels kvalitet og deretter massivt berg. Dette viser at lagene i stor grad følger topografien. At oppsprekkingen er stor i dagbergsonen, nær overflaten, er naturlig siden dette område er utsatt for vanngjennomstrømming, erosjon, forvitring og temperaturforandringer. Nær overflaten er også innspenningen mindre enn på større dyp der berget er massivt.

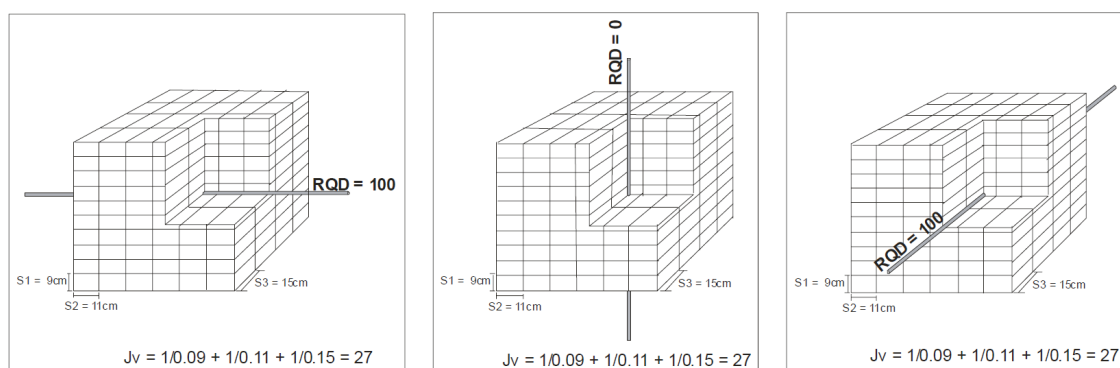
Gyldigheten til RQD og sprekkefrekvens

Nøyaktigheten til RQD og sprekkefrekvens vurderes også, samt om disse parameterne gir et godt innblikk i bergmassekvaliteten. Mange av sprekke som registreres ved kjernelogging kan være boreinduserte eller skapt ved selve håndteringen av borekjernene i ettertid. Det er vanskelig å vurdere under kjernelogging hva som er naturlige sprekker og ikke. Spesielt folierte bergarter med stort glimmerinnhold har lett for å sprekke opp langs foliasjonen. Derfor hadde det vært nyttig og deltatt på grovloggingen når kjernene tas ut for å få et innblikk i hvor mange av sprekke som skapes under boring. Ved vurdering av televieverdata ser man et betydelig lavere antall sprekker. Dette kan ha sammenheng med at televiever har vanskelig for å registrere tynne og foliasjonsparallele sprekker, men også at en stor andel av de registrerte sprekke ved kjernelogging kan være boreinduserte eller menneskeskapt. Dermed kan forholdsvis konservative verdier for sprekkefrekvensen og RQD bli registrert ved kjernelogging.

Bruk av RQD er også forbundet med en del begrensninger som kan påvirke det ingeniør-geologiske resultatet i en klassifisering. Ved bruk av RQD registreres alle sprekker større enn 10 cm. Det vil si at om kjernebitene er 10 cm lange vil man få en $RQD = 0$, mens om kjernebitene er 11 cm vil RQD bli $= 100$, se figur 5.6. I tillegg er RQD registrert i et borehull både endimensjonalt og retningsbestemt, noe som gjør at borehullets vinkel på sprekkesettene får stor betydning, se figur 5.7 (Palmstrom, 2005).



Figur 5.6: Viser at RQD varierer fra minimum til maksimumsverdi ut fra sprekkenes tetthet langs borekjernen (Palmstrom, 2005).



Figur 5.7: De tre bildene viser den samme bermassen, men borehull med ulike retninger. Avhengig av retningen på borehullet i forhold til bergmassens oppsprekking kan man så både RQD = 0 og RQD = 100 (Palmstrom, 2005).

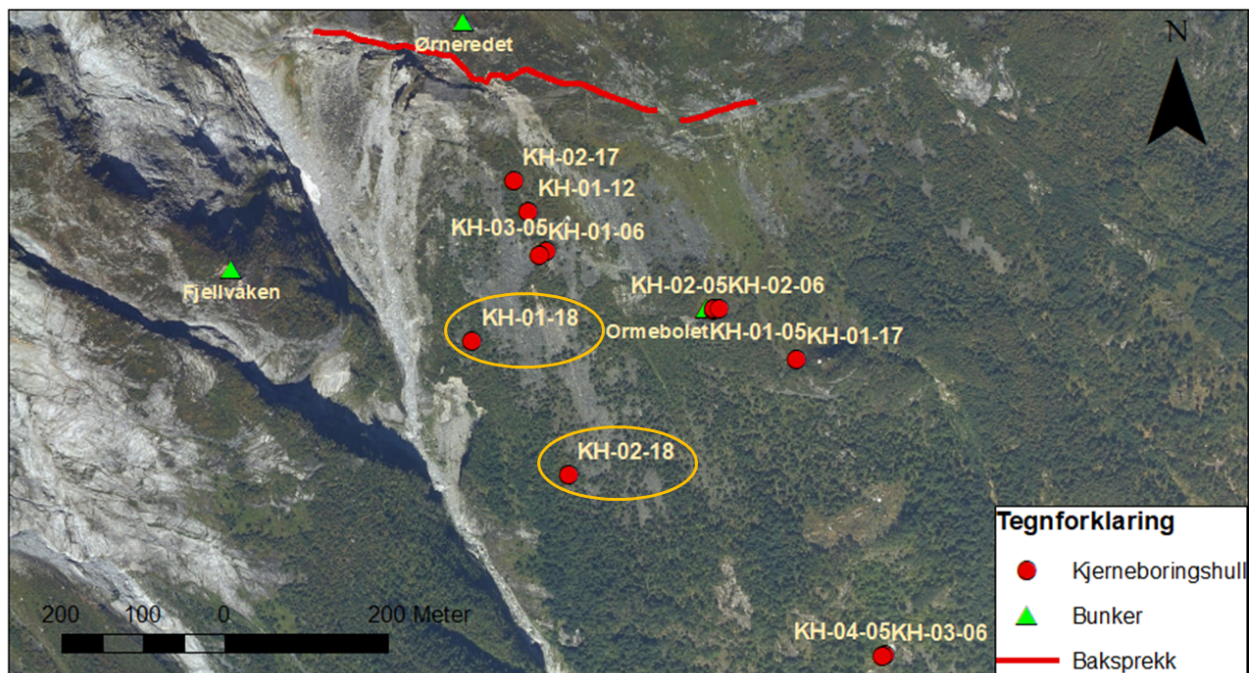
Videre vurderinger

Hvor oppsprukket bergmassen er gir ingen direkte indikasjon på at dette er soner med bevegelse. Sprekkene og knusningssonene som registreres under kjerneloggingen og størrelsen på disse sier lite om det er et mulig glideplan. Oppsprekkingen gir derimot informasjon om muligheten for vanninnstrømning og oppbygningen av vanntrykk. Den beste måten å identifisere hvor det er bevegelse i borehullet er ved hjelp av inklinometermålinger som er en del av DMS-systemet. Dette vil det bli gått nærmere inn på i kapittel 7. Når man vet hvor bevegelsen forekommer vil det være interessant å kunne sammenligne med oppsprekkingen og sprekkparameterne J_a og J_r .

Profilene har gitt et utgangspunkt for videre vurdering, der neste steg blir å legge inn mulige glideplan. Det bli også interessant å se på profil C-C' og D-D', som består av de nye borehullene fra 2018, lokalisert på vestsiden av skredområde der bevegelsene er størst.

Kjernelogging av 2018-borehullene

I det følgende kapittelet blir resultatene fra kjerneloggingen av borehull KH-01-18 og KH-02-18 gjennomgått, se i figur 6.1. Kjerneloggingen er utført som beskrevet i kapittel 4.2. For hvert av borehullene blir det gitt en gjennomgang av oppsprekningen, sprekkeparameterne og en beskrivelse av bergmassen.



Figur 6.1: Kjerneborehullene fra 2018 er indikert.

6.1 Kjernelogging av KH-01-18

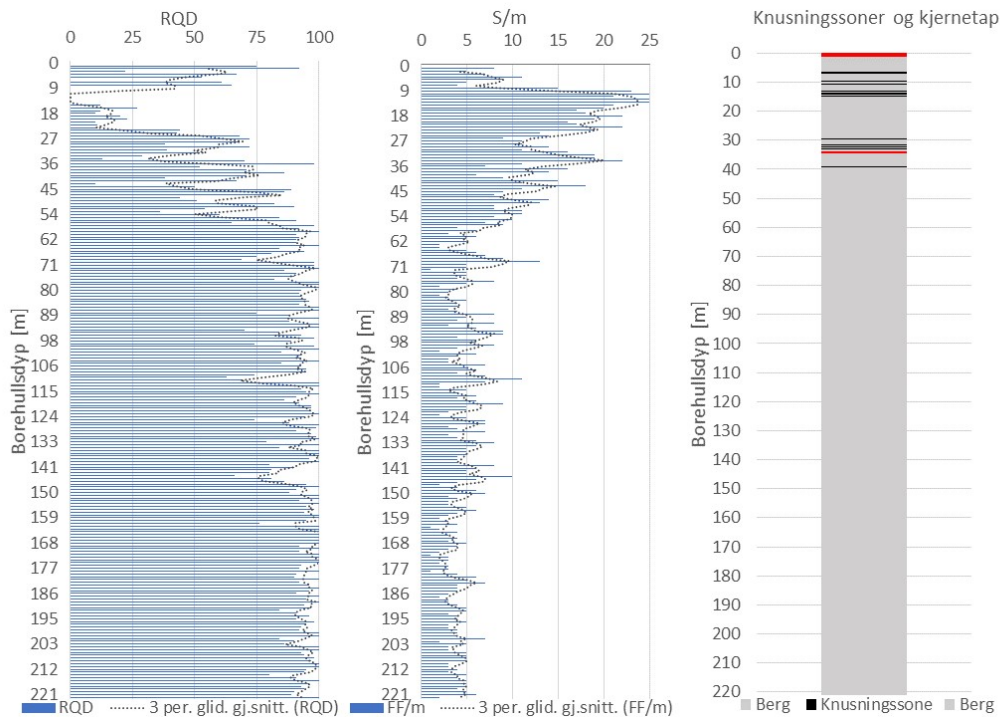
Borehull KH-01-18 ble kjerneboret sommeren/høsten 2018 av Geodrilling AS. Det vertikale borehullet er 221 meter dypt og lokalisert ved rennekanten, se figur 6.1. Kjerneloggingen ble utført av Henrik Langeland (NGI) og undertegnede i november 2018.

Informasjonen under er hentet fra datasettet av registreringer gjort under kjerneloggingen (NVE, 2019) og kjerneloggingsrapporten (Langeland, 2019a).

6.1.1 RQD, sprekkefrekvens og knusningssoner

Figur 5.2 viser en sammenstilling av RQD, sprekkefrekvens (s/m), knusningssoner og kjernetap nedover i borehullet. Den registrerte sprekkefrekvensen inkluderer både knusningssonene og de vanlige sprekkene. De øverste 40 meterne viser høy oppsprekking med lav RQD verdi og høy sprekkefrekvens. Gjennomsnittlig RQD=38 og S/m=14. Mellom 40 og 60 meter avtar oppsprekkingen. Her har vi en gjennomsnittlig RQD=69 og S/m=9. Fra 60 meter og ned anses bergmassen som massiv med en gjennomsnittlig RQD=92 og S/m=4.

Loggen til høyre i figur 6.2 viser en oversikt over områder med knusningssoner over 20 cm og kjernetap. De store knusningssonene forekommer hyppig de første 15 meterne og mellom 30 og 40 meter.



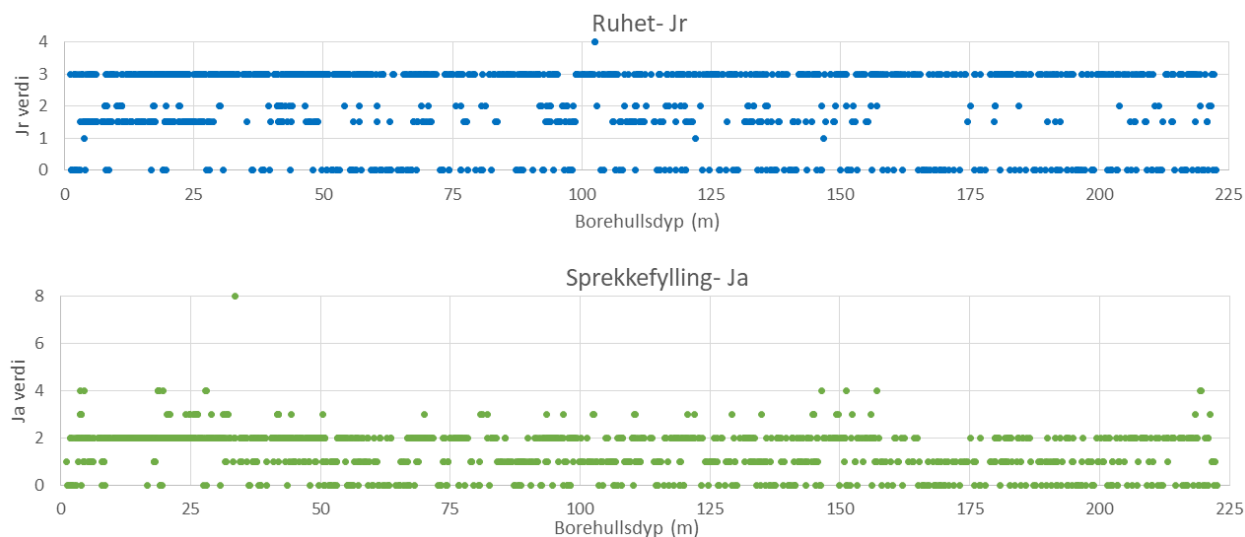
Figur 6.2: Oversikt over borehullet mot dypet. Viser RQD, sprekkefrekvens, kjernetap og knusningssoner større enn 20 cm. Modifisert etter kjernelogg (NVE, 2019) og (Langeland, 2019a).

6.1.2 Sprekkeparameterne

For alle sprekke, unntatt knusningssoner, registreres sprekkeparameterne J_a og J_r (Langeland, 2019a). Figur 6.3 viser fordelingen av sprekker med ulik ruhet og sprekkefylling mot borehullsdypet. Verdiene er gitt etter NGI (2015), og for ytterligere forklaring henvises det til vedlegg B. Som nevnt i kapittel 4 forsøker borerne å merke av kunstige sprekker. Andre sprekker som loggeren har tolket til å være kunstige blitt gitt J_a - og J_r verdi lik 0 (Langeland, 2019a).

Ut fra de registrerte sprekkeverdiene er de fleste ruhetene registrert med J_r verdi 3 (ru, ujevn og bølgete) og 1,5 (ru, ujevn, plan). For sprekkefylling er det registrert flest med J_a verdi 1 (uomvandlede sprekkeflater, kun overflateoksidasjon) og 2 (svakt omdannede sprekkeflater. Uoppbløtelig mineralbelegg, sandpartikler uten leir). Enkelte sprekker har belegg og mineralfylling ($J_a=3$ og 4) og én sprekke er registrert som sone eller bånd av leir eller knust berg ($J_a=8$) (Langeland, 2019a).

Først og fremst ser man etter verdier som kan antyde lavere friksjon på sprekke. Dette gjelder spesielt sprekker registrert med $J_r=0,5$ (glidespeil, plan), 1 (glatt, plan), og med sprekkefylling $J_a=4$ eller høyere (leirbelegg med lav friksjon eller mineralfylling). Ut fra de registrerte sprekkeverdiene er det få sprekker som gir tydelig indikasjon på lav friksjon. Og det er ingen sprekker der både J_a og J_r indikerer lav friksjon.



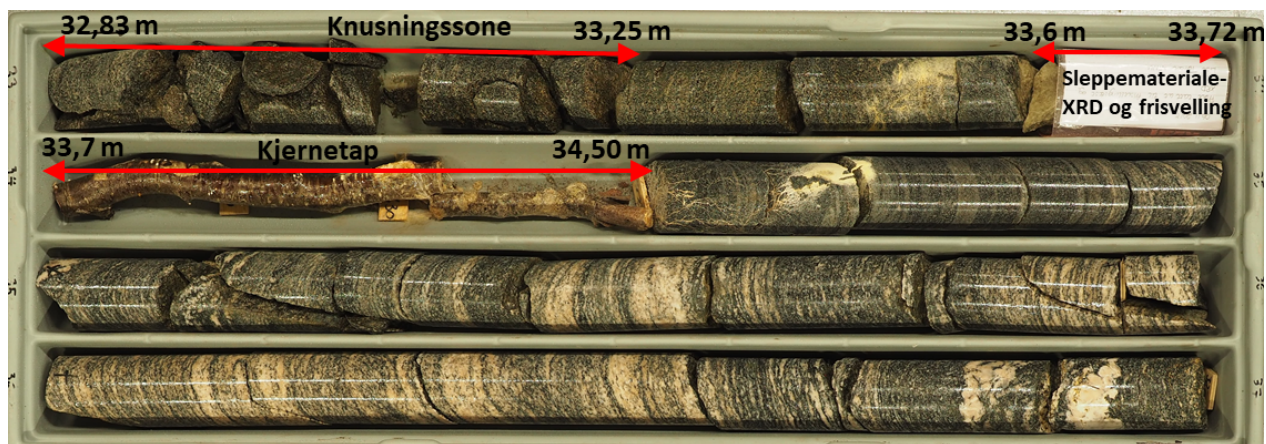
Figur 6.3: Sprekkeparameterne. For utdypende beskrivelse av sprekkeparameterne henvises det til vedlegg B. Modifisert av forfatter etter (Langeland, 2019a) og (NVE, 2019).

6.1.3 Beskrivelse av bergmassen

Bergmassen er beskrevet etter ISO standarden og er definert som en foliert og metamorf gneis med variasjon i farge, kornstørrelse og mineralinnhold. Fargen er lys til mørk grå/svart,

stedvis med lyse og rosa bånd. Bergarten kan stedvis være mørk grønnlig. Kornstørrelsen varierer fra fin/medium til grovkornet. De mest tydelige mineralene er kvarts, feltspat og glimmer (Langeland, 2019a).

Figur 6.4 viser kjernebilde fra omtrent 33-37 meter. Fra 33,6-33,72 meter er det registrert en knusningssone med silt/leirinnhold og et påfølgende kjernetap fra 33,72-34,50 (Langeland, 2019a). Sonen med sleppemateriale ble under prosjektoppgaven tatt ut og testet. Hverken frisvellingstesten eller XRD viste svellende mineraler (Tønset, 2018). Knusningssonen og kjernetapet kan likevel tyde på bevegelse i området. Om dette stemmer kan etterhvert verifiseres når borehullet sommeren 2019 blir instrumentert med DMS.



Figur 6.4: Kjernebilde mellom 32,83 til 36,83 meter. Viser et område med både knusningssone, sleppemateriale og kjernetap. Bilde er hentet fra (NVE, 2019) og modifisert av forfatter.

6.2 Kjernelogging KH-02-18

KH-02-18 er et vertikalt kjerneboringshull boret høsten 2018 av Geodrillinge AS. Borehullet er lokalisert ved Tåa og er 199.4 meter dypt, se figur 6.1. Kjerneloggingen ble utført av Henrik Langeland ved NGI og undertegnede i november-desember 2018.

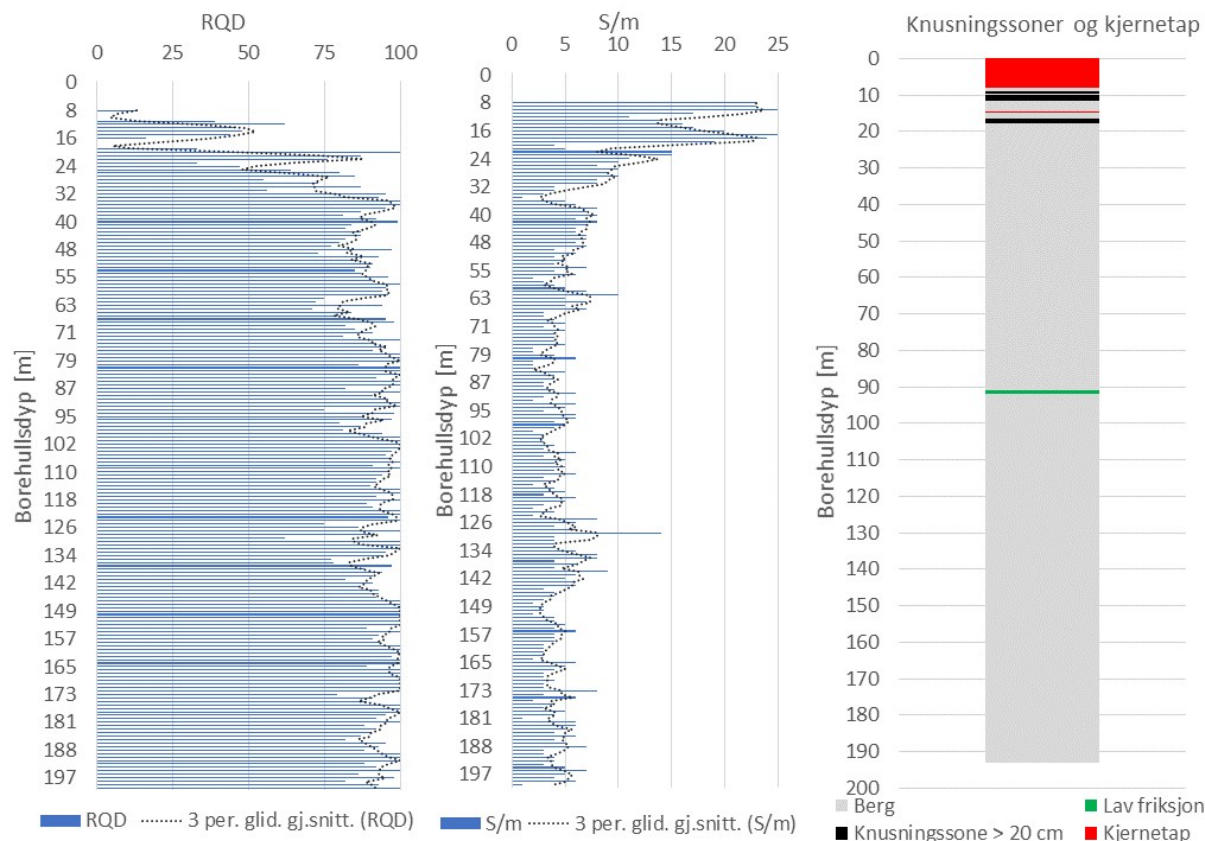
Informasjonen presentert under er basert på data fra kjerneloggingen hentet fra NVEs ftp server (NVE, 2019) og fra kjerneloggingsrapporten (Langeland, 2019c).

6.2.1 RQD, Sprekkefrekvens og knusningssoner

Figur 6.5 viser en oversikt over borehullets RQD, sprekkefrekvens (S/m), knusningssoner og kjernetap. Den registrerte sprekkefrekvensen inkluderer både knusningssonene og de vanlige sprekke. Det høye antallet knusningssoner de øverste 20 meterne bidrar derfor til en høy sprekkefrekvens. RQD og sprekkefrekvensen viser en høyt oppsprukken bergart de første 25 meterne. Gjennomsnittlig RQD= 25 og S/m =20. Deretter avtar sprekkefrekvensen mens

RQD øker gradvis til omtrent 70 meter. I dette området mellom 25-70 meter er gjennomsnittlig RQD= 84 og S/m= 6. Herfra anses berget for å være intakt, med gjennomsnittlig RQD=94 og S/m=4. Sprekkene som oppstår er ofte foliasjonsparallele sprekker.

Loggen til høyre i figur 6.5 viser en oversikt over knusningssoner større enn 20 cm, kjernetap og områder med lav friksjon. De første meterne av kjerneloggen består av kjernetap. Dette kommer av bergets oppsprekking i dagbergssonen. Knusningssonene forekommer som nevnt hyppig de første 20 meterne før de blir mindre og avtar nedover i borehullet.



Figur 6.5: Oversikt over borehullet mot dypet. Viser RQD, sprekketett, kjernetap og knusningssoner større enn 20 cm. Modifisert etter datasett fra loggen (NVE, 2019) og (Langeland, 2019c).

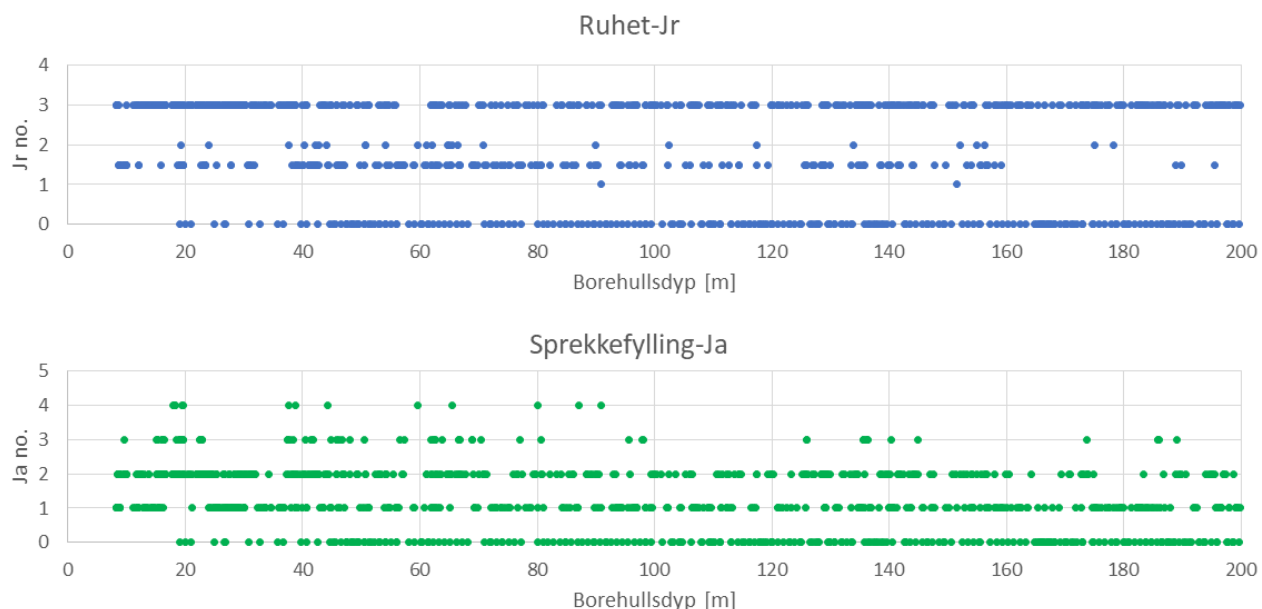
6.2.2 Sprekkeparametere

Figur 6.6 indikerer registrerte verdier for sprekkeparametere J_r (ruhet) og J_a (sprekkefylling) mot borehullsdypet. Verdiene er gitt etter NGI (2015), og for ytterligere forklaring henvises det til vedlegg B.

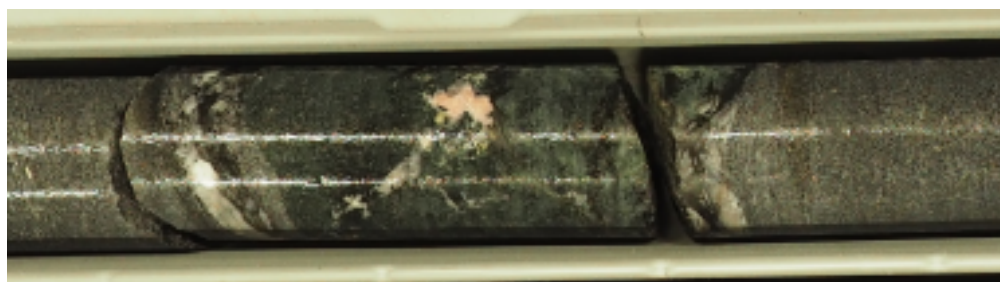
Registreringen viser at de fleste sprekkene er registrert med J_r verdi 3 (ru eller ujevn, bølgete) og 1,5 (ru, ujevn, plan). Enkelte sprekker har fått J_r -verdi 1 (glatt, plan) og 2 (glatt,

bølgete). Registreringene av sprekkefylling viser flest sprekker med J_a -verdi 1 (Uomvandlede sprekkeflater, kun overflateoksidasjon) og 2 (Svakt omvandlede sprekkeflater. Uoppbløtelig mineralbelegg). Enkelte sprekker er også registrert med siltig og sandig sprekkebelegg eller med oppbløtelig leirbelegg med lav friksjon ($J_a=3$ eller 4)

Av de registrerte sprekkenes er det ett område som framtrer som et mulig område med lav friksjon. Dette område har tall som indikerer sprekkefylling og glatte/plane sprekker. Dette område ligger ved 90,98 meter og sprekken er registrert med $J_a=4$ (oppbløtelig leirbelegg med lav friksjon) og $J_r=1$ (glatt og plan). Dette er indikert i figur 6.7.



Figur 6.6: Sprekkeparametere for KH-02-18. For utdypende beskrivelse av sprekkparametere henvises det til vedlegg B. Modifisert av forfatter etter (Langeland, 2019c) og (NVE, 2019).



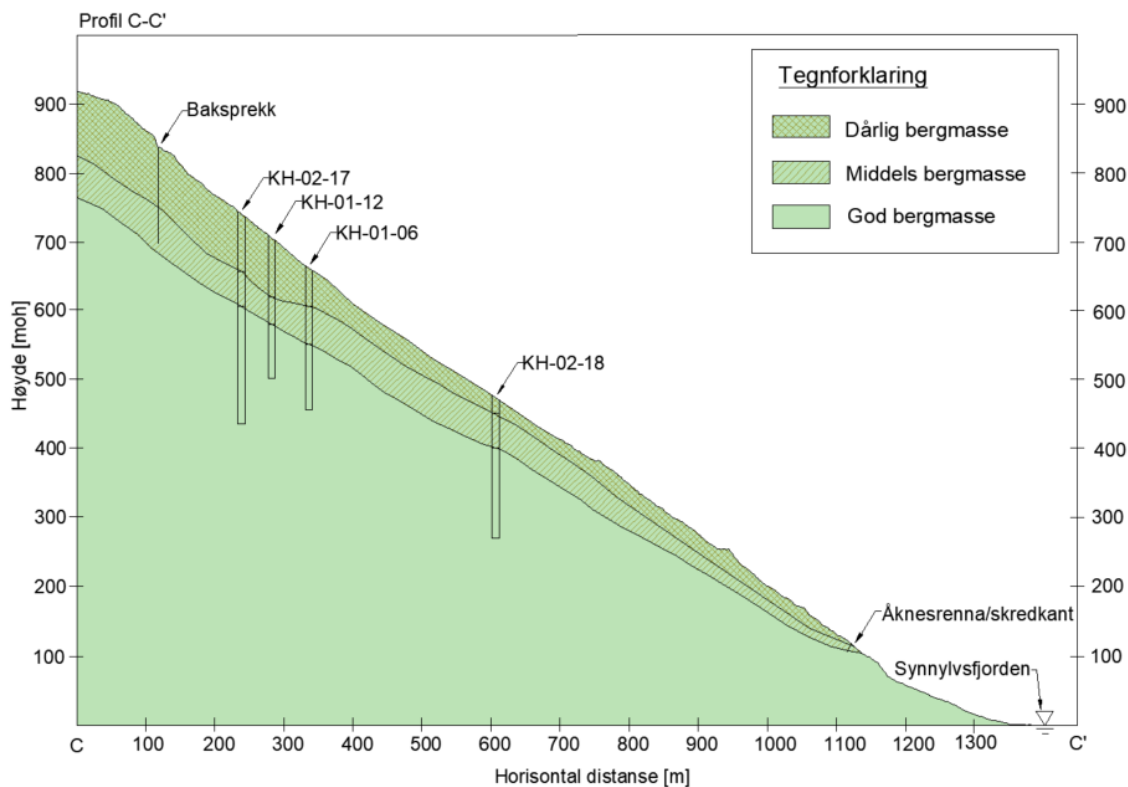
Figur 6.7: Sprekken på 90,98 meters dyp. Sprekkeparametere indikerer redusert friksjon (NVE, 2019).

6.2.3 Beskrivelse av bergmassen

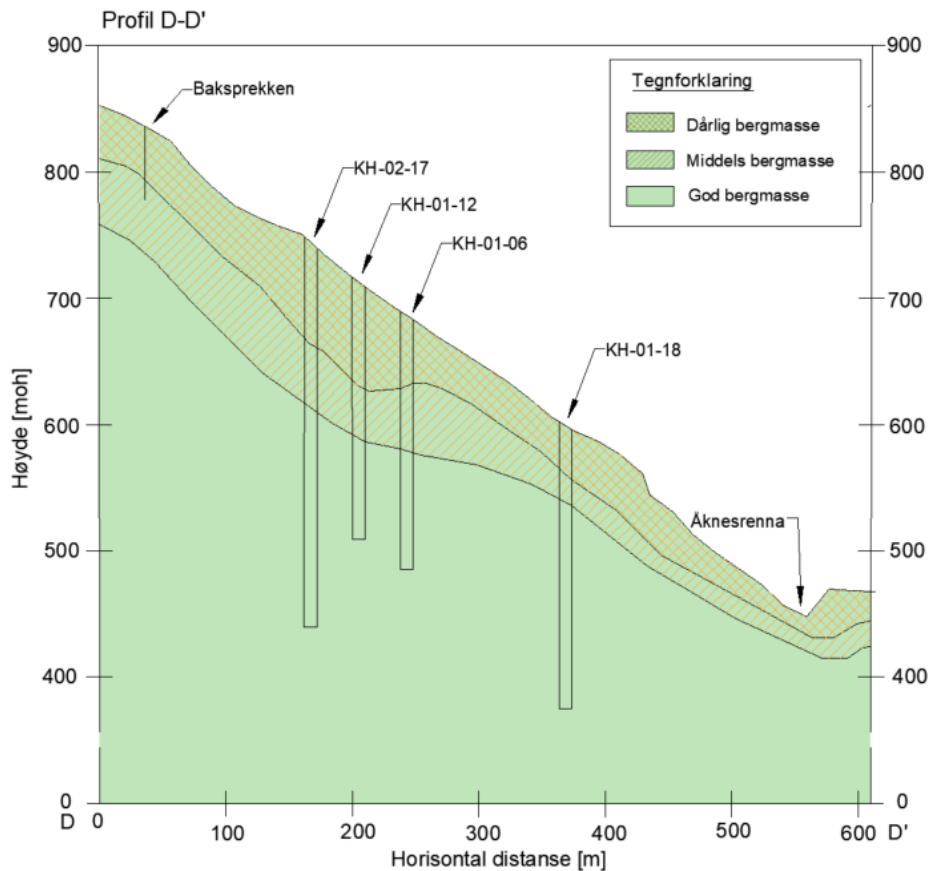
Med ISO (2017) som utgangspunkt er bergarten beskrevet som metamorf foliert gneis med varierende kornstørrelse og farge. Kornstørrelsen varierer fra fin- til grovkornet. Mineralinnholdet består av feltspat, kvarts og glimmer. Bergartsfargen varierer fra lys til mørk grålig med røde og lyse bånd (Langeland, 2019c).

6.3 Profiler basert på oppsprekningen

Som presentert i kapittel 5 er det tegnet opp fire profiler (A-A', B-B', C-C' og D-D'), se figur 5.3. Profil A-A' og B-B' ble presentert i prosjektoppgaven. Nå som borehullene fra 2018 er ferdig logget kan også profil C-C' og D-D' presenteres. Her er det gjort tilsvarende som i prosjektoppgaven, der RQD og sprekkefrekvens er koblet opp mot bergmassekvalitet, se tabell 5.2. Borehullene er tegnet opp med graden av oppsprekking registrert ved kjerneloggingen. Deretter er denne oppsprekningen tolket mellom borehullene slik at det gis et innblikk i oppsprekningen langs hele profilet. Siden oppsprekningen kan sees i sammenheng med bergmassekvaliteten gir dette et grunnleggende innblikk i forholdene ved Åkneset. Profilene er presentert i figur 6.8 og figur 6.9.



Figur 6.8: Profil C-C' med borehull og indikasjon for bergmassekvaliteten basert på RQD og sprekkefrekvens.



Figur 6.9: Profil D-D' med borehull og indikasjon for bergmassekvaliteten basert på RQD og sprekkefrekvens.

6.3.1 Oppsummerende bemerkninger

Som nevnt i kapittel 5 er det en del usikkerheter og begrensninger knyttet til RQD og sprekkefrekvens. Likevel anses disse parameterne som god nok til å gi et innblikk i hvordan oppsprekningen forandrer seg nedover i borehullet.

Profilene som er basert på kjernelogging viser et øvre lag med høy oppsprekking, før oppsprekningen gradvis blir mindre og berget blir intakt. Dette er forventet med tanke på forvitring i dagbergsonen. Samtidig vil større overdekning føre til større innspenning dypere inn i fjellsiden, noe som vil redusere antall sprekker.

Det profilene viser er naturlig og forventet, men gir også et innblikk i dybden til de ulike bergmassekvalitetene. Som tidligere nevnt er det ingen eksakte grenser som skiller god og dårlig bergmasse, så grensene er satt etter en subjektiv vurdering. Profilene kan være nyttig når man videre skal vurdere hvor bevegelsene i fjellsiden ligger og om dette har sammenheng med oppsprekking og knusningssoner.

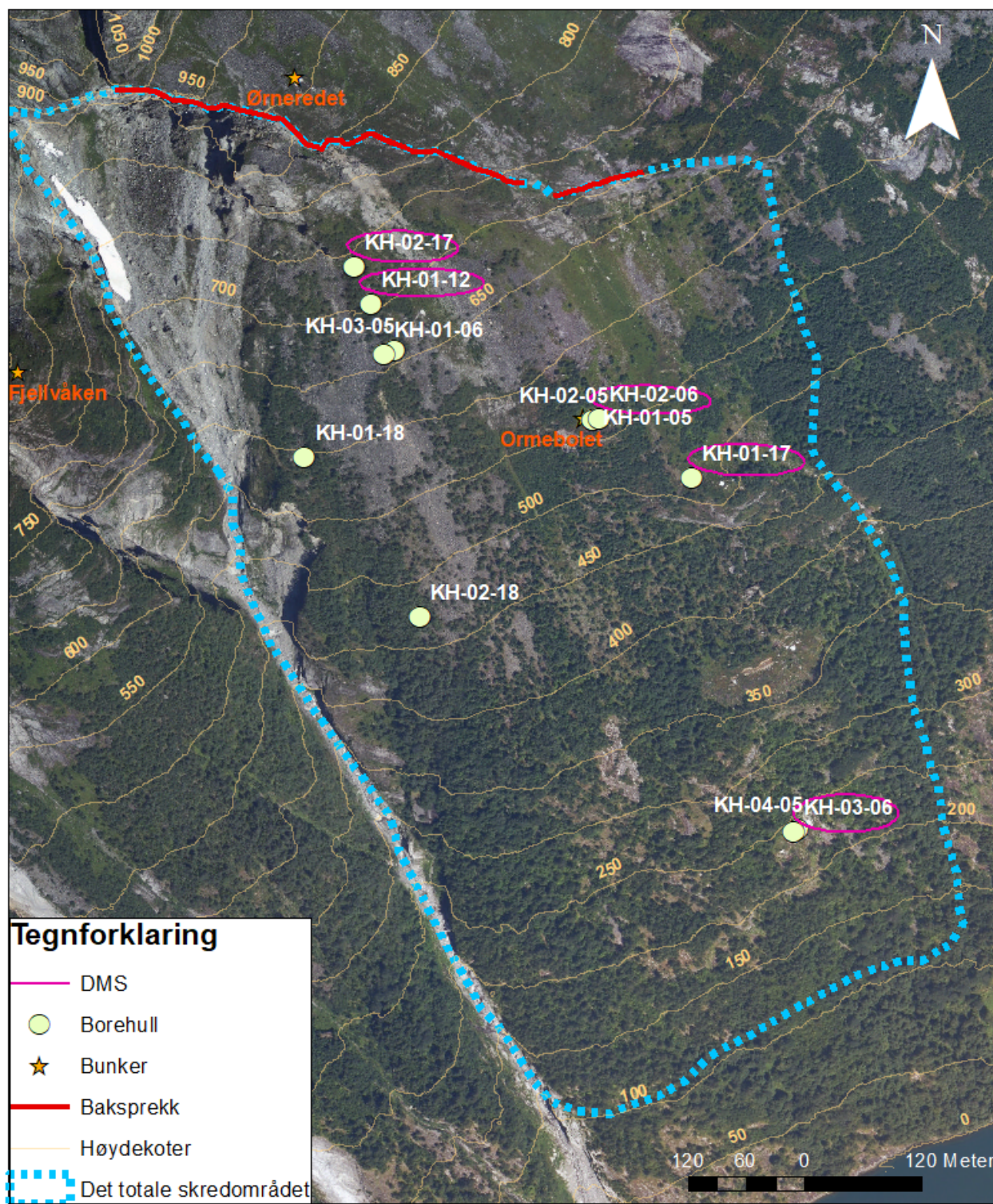
Kartlegging av glidesoner

For å finne ut hvor de ulike glideplanene ligger er det nødvendig å identifisere hvor det skjer bevegelse i borehullene. Dette gjøres med DMS-kolonner som er installert i fem av borehullene ved Åkneset, se figur 7.1. Borehullene fra 2018 skal instrumenteres sommeren 2019. Som forklart i kapittel 4 består DMS-systemet av et inklinometer som gir informasjon om forskyvning og bevegelsesretning, og blir her brukt til å identifisere glideplanene i borehullene.

I det følgende kapittelet presenteres identifiserte glidesoner i de fem borehullene med DMS. Disse sonene og områdene i nær tilknytning blir karakterisert og beskrevet. Dette er gjort ved å sammenligne televierbilder, kjernebilder og kjernelogg for de aktuelle sonene. Videre skal bergmassen ved disse skjærsonene laboratorietestes. Derfor skal disse opplysningene benyttes når kjerneprøver skal tas ut til laboratorietesting og når glideplanene skal tegnes opp i profilene vist i figur 5.3.

7.1 Borehull med DMS

Som nevnt er det 5 borehull med DMS. Disse borehullene er markert i figur 7.1. I tabell 7.1 vises en oversikt over borehullene, samt soner med bevegelse, forskyvning, retning og måleperiode. Sonene kan være områder med mulige glideplan og blir lagt vekt på senere i dette kapittelet. Denne informasjonen er hentet fra DMS målinger gitt av (NVE, 2019), der deler av datagrunnlaget kan finnes i vedlegg C. Alle bilder fra kjernebassene og televierbilder benyttet i denne delen er hentet fra NVEs ftp server (NVE, 2019).



Figur 7.1: Borehullene der det er installert DMS-kolonner er merket med rosa ring.

Tabell 7.1: Oversikt over glideplan. I tillegg vises dybden til DMS kolonnen, forskyvningen og retningen til glidesonene, samt måleperioden. KH-01-18 og KH-02-18 vil bli instrumentert sommeren 2019.

Navn	Lengde DMS-kolonne [m]	Sone	Dybde glideplan [m]	Forskyvning [mm]	Omtrentlig retning	Måleperiode
KH-02-18						Instrumenteres sommeren 2019
KH-01-18						Instrumenteres sommeren 2019
KH-02-17	130	1	30-34	8	N180 Ø	15.10.2018- 29.01.2019
		2	66-71	7		
		3	120-121	1		
KH-01-17	105	1	35-36	2	N155 Ø	15.10.2018 14.01.2019
		2	38-41	1		
		3	48-49	0,5		
KH-01-12	150	1	24-25	19	Nedre:N260Ø Øvre: N190 Ø	24.09.2015- 29.01.2019
		2	27-31	33		
		3	52-57	16		
		4	61-63	163		
		5	94	14		
KH-03-06	120	1	35-85	Kryp \approx 74	N170Ø	18.09.2015-01.01.2019
KH-02-06	120	1	13-15	24	N216 Ø	20.09.2015- 25.10.2018
		2	27-29	28		
		3	32-35	40		

7.2 Korrelasjon mellom kjernebilder og televieverbilder

Inklinometermålingene fra DMS ble som nevnt sammenlignet med televiever, kjernelegg og kjernebilder. Derfor ble det viktig å finne en korrelasjon mellom disse, slik at informasjonen kunne sammenstilles.

For å kunne vurdere televieverbildene mot kjerneleggen og kjernebildene var det nødvendig å se på hvordan disse samsvarte og om det var store avvik i borehulldypet. Avvikene mellom televiever og kjernelegg kan komme av forskyvninger i kjernebassene ved knusningssoner eller unøyaktigheter når borerne merker av kjernetap. Forskyvninger kan også komme av at målingene starter på ulike høyder, altså at de ikke har samme nullpunkt. Nullpunktet settes normalt til toppen av casingen. Her er det tatt utgangspunkt i at televieveren stemmer og har toppen av casingen i borehullet som nullpunkt.

Det er viktig å gjøre denne korrelasjonen slik at man får et så nøyaktig dyp til glideplanet som mulig. Korrelasjonen ble gjort ved å gjenkjenne og plassere ulike strukturer i loggene på nøyaktige dyp i borehullene. På figurene som vises i det følgende kapitlet stemmer ikke alltid dypet indikert i televiever og kjernebasser, dette er på grunn av disse avvikene.

7.3 Glidesoner i KH-02-17

KH-02-17 ligger ved øvre del av Åknes skredområde se figur 7.1. Borehullet er 300 meter dypt og ble kjerneboret høsten 2017.

7.3.1 Identifisering av glideplan

DMS-kolonnen i KH-02-17 strekker seg 129 meter ned i borehullet. Til tross for den korte måleperioden fra 15.10.2018 til 29.01.2019, viser målingene tydelige områder med bevegelse.

Figur 7.2 viser DMS-målingene. Grafen til venstre gir kumulativ total forskyvning (modul displacement). De horisontale blå linjene indikerer poretrykk i seksjoner i borehullet. Det henvises til vedlegg C for mer informasjon om grafene.

To markante soner med bevegelse vises på grafen, og en oversikt finnes i tabell 7.2. Den første og mest markante sonen ligger mellom 30-34 meter. Her er det registrert en bevegelse på 8 mm i løpet av måleperioden. Den neste sonen ligger mellom 66-71 meter og har en total forskyvning på 7 mm. Det er også registrert ett mindre tydelig glideplan ved 120 meter med en forskyvning på 1 mm. Totalt har det vært en forskyvning på 19 mm i borehullet langs DMS-kolonnen. Den totale forskyvningen langs de identifiserte glidesonene er 16 mm. På grunn av den korte måleperioden kan disse målingene endre seg mye, spesielt i perioder med mye nedbør og ved snøsmelting på våren.

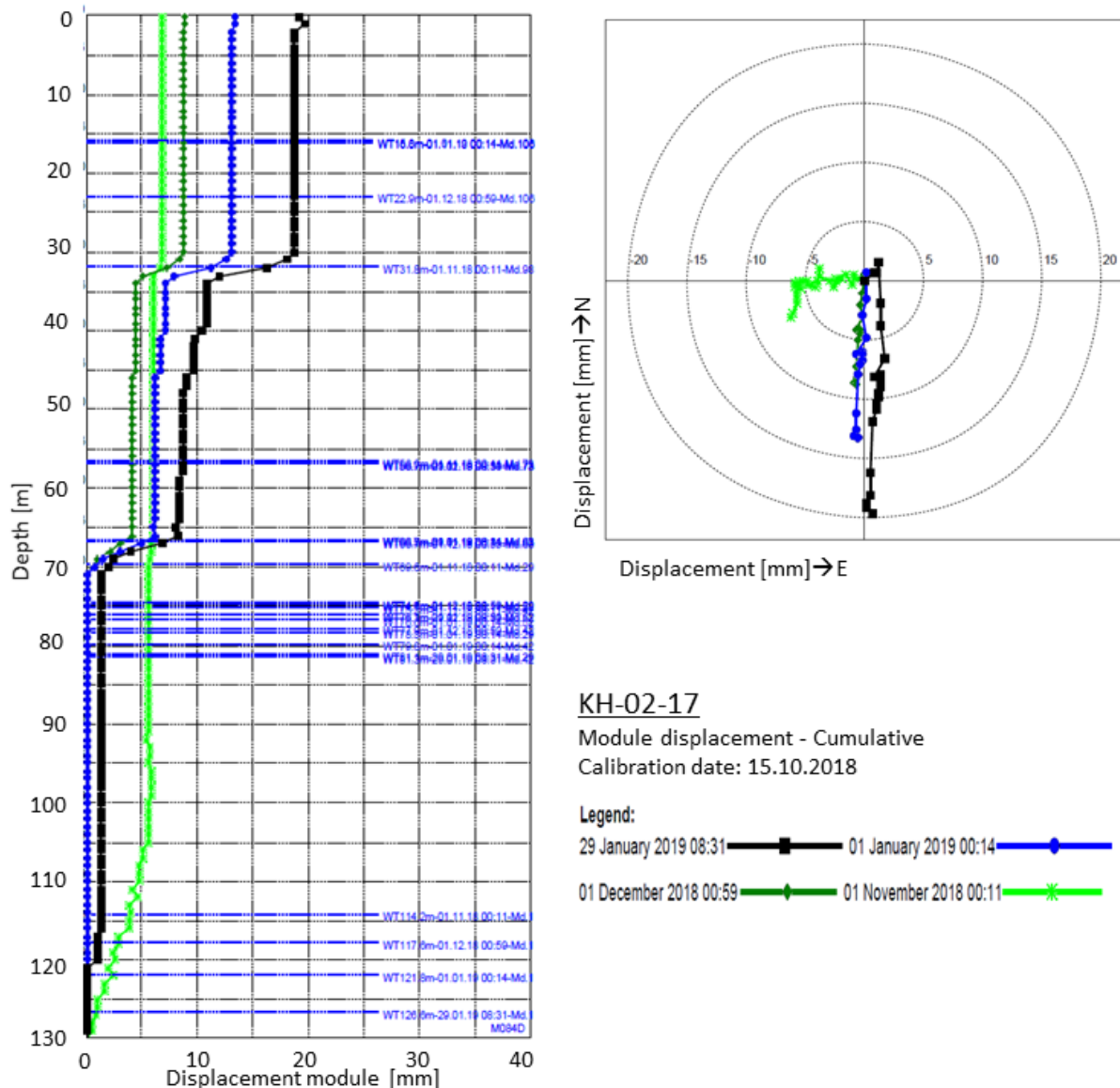
Til høyre i figur 7.2 vises retningen til bevegelsen. Origo viser bunn av DMS-kolonnen og regnes som nullpunktet. Det vil si at bevegelsen har retning mot sør, ned mot fjorden. Den lysegrønne målingen fra 1. november 2018 er ikke samsvarende med resten av målingene. Det er usikkert hva som forårsaker dette.

Tabell 7.2: Oversikt over glideplan for KH-02-17.

Borehull	Dybde DMS-kolonne [m]	Sone	Dyb bevegelse DMS [m]	Forskyvning [mm]	Omtrentlig retning	Måleperiode
KH-02-17	129	1	30-34	8	N180Ø	15.10.2018-29.01.2019
		2	66-71	7		
		3	120-121	1		

7.3.2 Beskrivelse av bergmassen og sprekkeparameterne

Bergarten defineres som en metamorf og foliert gneis med ulik kornstørrelse og farge (Langeland, 2019b). Fargen veksler mellom å være rødlig og gråfarget med variasjoner fra lys grå til mørk svart. Kornstørrelsen varierer fra fin- til grovkornet. Mineralinnholdet består av kvarts feltspat og glimmer. Disse forekommer ofte i bånd av ulik mektighet.

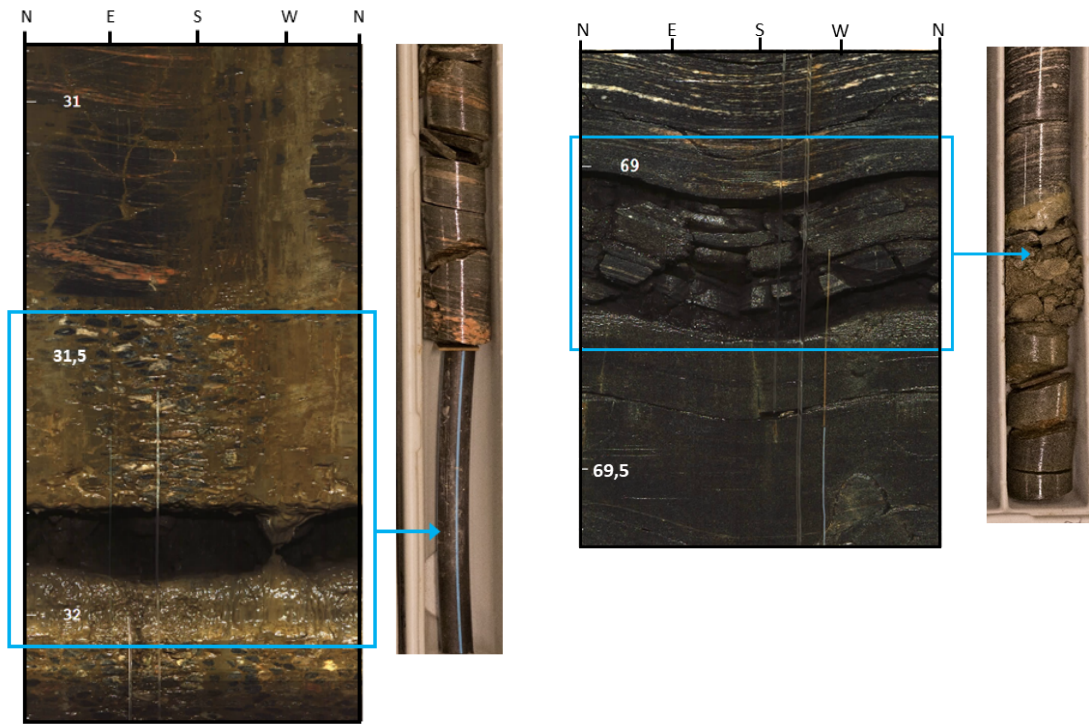


Figur 7.2: Inklinometermålingene indikerer de områdene i borehullet KH-02-17 der det er bevegelse. Til venstre vises total forskyvning mens polplottet til høyre viser retningen til bevegelsen NVE (2019).

Sone 1 ved 30-34 meter viser et område med grovkornet gneis med grå til mørkegrå farge og rødlige bånd. Televiewerbilder fra dette området viser at det er en stor andel løst materiale, se figur 7.3. I følge Geodrillings borelogg er dette området støpt for å unngå at hullet kollapser. Det som ser ut som løst materiale på televiewerbildene er antatt å være betong fra støpningen. Dette verifiseres av kjernebildene som viser flere store områder med kjernefap.

Gneisen rundt sone 2 (65-70 m), er mørk og finkornet. Ved 69 meter ser man det som antas å være et glideplan, se figur 7.4. Her viser televiewerbildene en tydelig sone som kan samsvare med leirsonen funnet ved kjerneologgingen. Sprekkeparameterne gitt ved kjerneologgingen tilsier

at dette området kan ha lavere friksjon og samsvarer dermed med at det kan være et mulig glideplan. Den mulige glidesonen er definert som en knusningssone med høyt leirinnhold. Denne ligger i grensen mellom lys/grovkornet bergart og mørk/finkornet bergart. Den mørke bergarten antas å ha et høyt glimmerinnhold og har en lav foliasjonsvinkel i sørlig retning. Noe som kan tyde på at bevegelsen skjer langs foliasjonens fall.



Figur 7.3: Området rundt 32 meter viser kjernetap. Det som ser ut som løst materiale på televiererbildet antas å være betong fra støpning. Bilder fra NVE (2019).

Figur 7.4: Sone 2 ved 69,7 meter. Ut fra televiererbildet sees den mulige glidesonen som en oppknust sone. Sammenligner man med kjernebilder sees en leirig knusningssone. Bilder fra NVE (2019)

7.4 Glideplan i KH-01-17

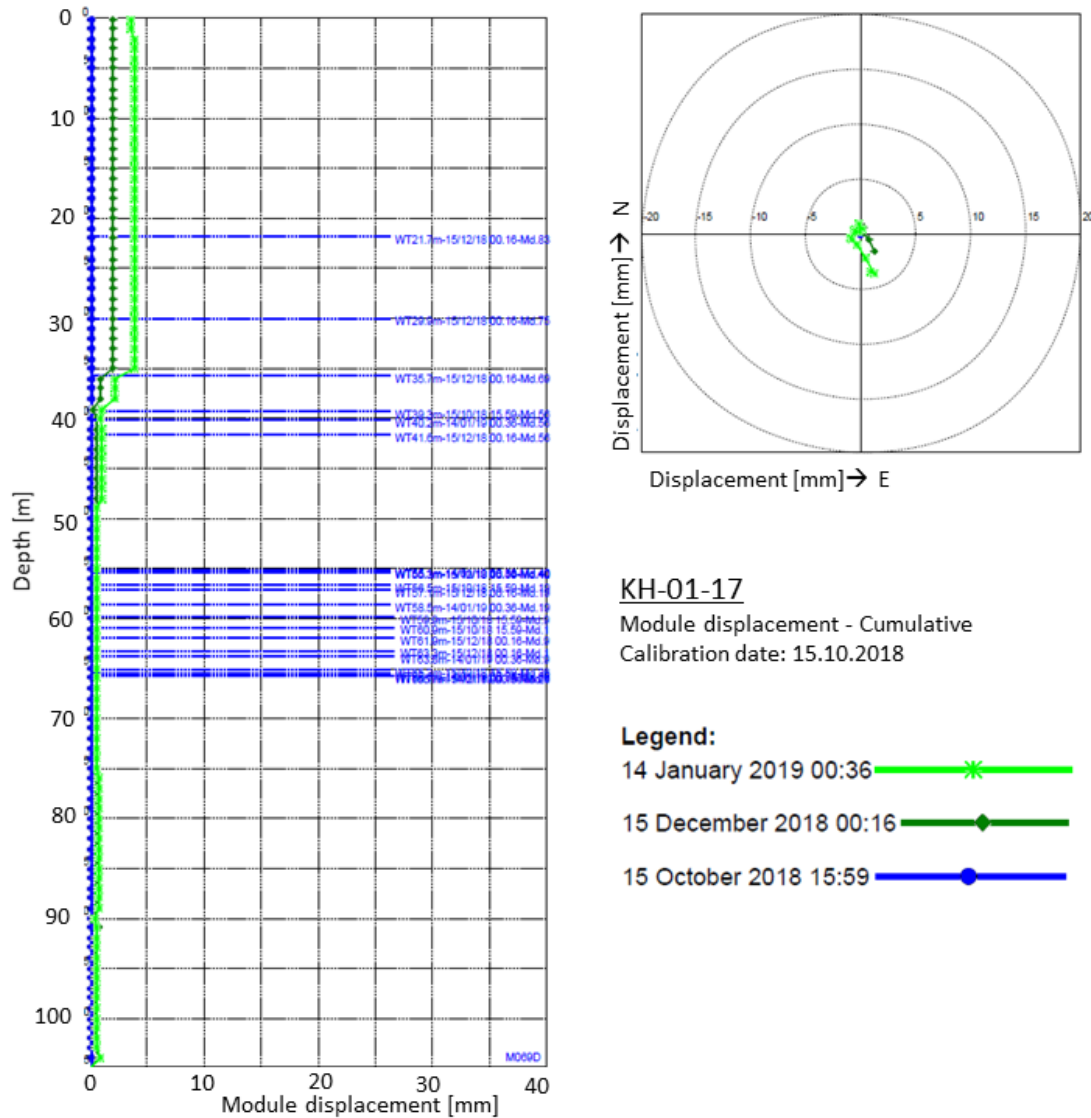
KH-01-17 ble boret høsten 2017. Borehullet er 302,7 meter dypt og lokalisert ved Kulen, omtrent midt i skredområdet, se figur 7.1.

7.4.1 Identifisering av glideplan

DMS kolonnen ble installert i oktober 2018 og er 105 meter lang. Det er begrensede datamengder fra dette borehullet da systemet bare har målt frem til midten av januar 2019. Selv om måleperioden er kort, vises små utslag på DMS målingene. Figur 7.5 viser total

forskyvning (modul displacement) og retningen til bevegelsen. Det henvises til vedlegg C for mer informasjon om grafene.

Tre soner med bevegelse er registrert. En oversikt over bevegelsessonene finnes i tabell 7.3. Sonene ligger ved 35-36 meter, 38-41 meter og 47-49 meter. Forskyvningen i disse sonene er forholdsvis lav, mellom 0,5-2 mm. Dette kan ha sammenheng med den korte måleperioden. Totalt er det en forskyvning på 3,6 mm langs hele borehullet, derav skyldes 3,5 mm bevegelse lags de registrerte glideplanene. Polplottet viser bevegelse mot sør-øst.



Figur 7.5: DMS målingene viser hvor det er bevegelse i borehull KH-01-17. Polplottet til høyre viser bevegelsens retning. Modifisert av forfatter etter (NVE, 2019).

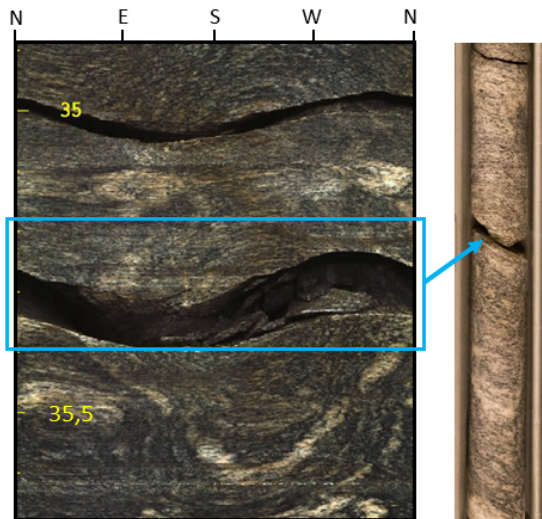
Tabell 7.3: Oversikt over soner med bevegelse i borehull KH-01-17.

Borehull	Dybde DMS-kolonne [m]	Sone	Dybde glideplan [m]	Forskyvning [mm]	Omtrentlig retning	Måleperiode
KH-01-17	105	1	35-36	2	N155Ø	15.10.2018- 14.01.2019
		2	38-41	1		
		3	48-49	0.5		

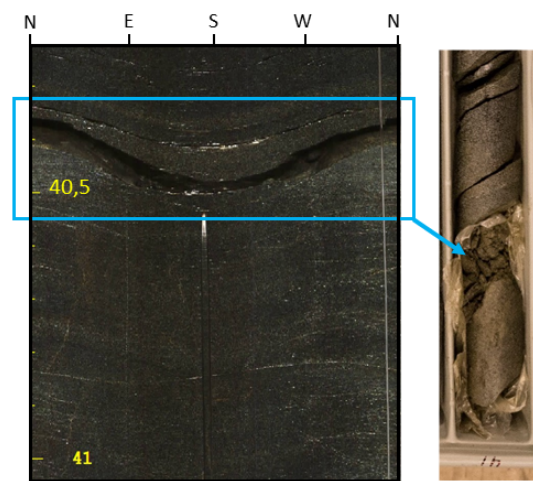
7.4.2 Beskrivelse av bergmassen og sprekkeparameterne

Bergarten blir i kjerneloggen definert som en metamorf og foliert gneis med varierende kornstørrelse og farge. Fargen varierer fra lys grå til mørk svart, og kornstørrelsen varierer fra fint til grov. Mineralinnholdet består av feltspat, kvarts og glimmer som ofte forekommer i bånd av ulik mektighet. Kjerneloggen viser at kjernene er svært oppsprukket med flere knusningssoner de øverste 40 meterne, og 3 soner med kjernetap (Langeland, 2018).

Sone 1 (35-36 m) indikeres av en tydelig sprekk på televierbildene, se figur 7.6. Denne sprekken er registrert med $J_r = 1,5$ og $J_a = 1$ og indikerer ikke lavere friksjon (NVE, 2019). Sone 2 (38-41 m) ligger i en mørk og finkornet gneis og vises som en tydelig sprekk på televierbildene ved omtrent 40,4 meter. I kjernekasen finnes leire i denne sonen, se figur 7.7. Registrert J_r verdier er 1 og J_a verdi er 6, noe som indikerer en glatt og plan flate med uoppbløtelig leirinnhold. Dette vil redusere friksjonen langs planet. Generelt viser området fra 40- 50 meter en høyere andel sprekker med lavere friksjon (Langeland, 2018).



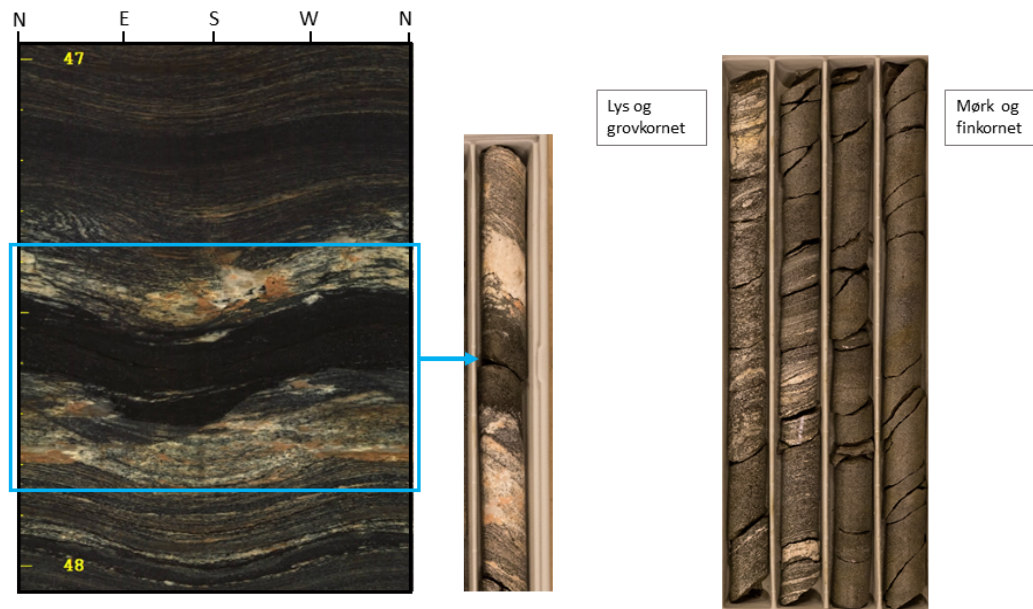
Figur 7.6: Sone 1: Viser at antatt glideplan ligger ved omtrent 35.3 meter, indikert av en sprekk som vises både på televierbildet og på kjernebildene. Bilde fra NVE (2019).



Figur 7.7: Sone 2: Antatt glideplan ved 40.4 meter i televierbildet ser man igjen som en leirsoner i kjernekasene. Dette er et område med lavere friksjon. Bilde fra NVE (2019).

Ved sone 3 (47-49 m) er glideplanet antatt å ligge i det mørke og finkornete båndet ved omtrent 47,5 meter, se figur 7.8. Sprekken er registrert med $J_r=1$, og $J_a=3$ (NVE, 2019). Det betyr en ru, ujevn og plan flate med siltig eller sandig sprekkebelegg med litt leir.

I dette borehullet ligger flere av bevegelsessonene i deler av bergarten som er mørk og finkornet. Denne antas å være svakere enn den omliggende bergarten som framstår som mer lys og grovkornet. Den mørke gneisen kan inneholde større mengder biotitt som reduserer styrken til bergarten. Figur 7.9 viser denne overgangen fra lys og grovkornet til mørk og finkornet bergart.



Figur 7.8: Sone 3: Det er antatt at glideplanet i denne sonen ligger i den mørke bergartstypen markert på figuren. Denne sonen ligger ved omtrent 47.5 meter. Bilde fra NVE (2019).

Figur 7.9: Viser overgangen fra lys og grovkornet til mørk og finkornet bergart. Det er antatt at den mørkere bergmassen er svakere enn den lyse. Bilde fra NVE (2019).

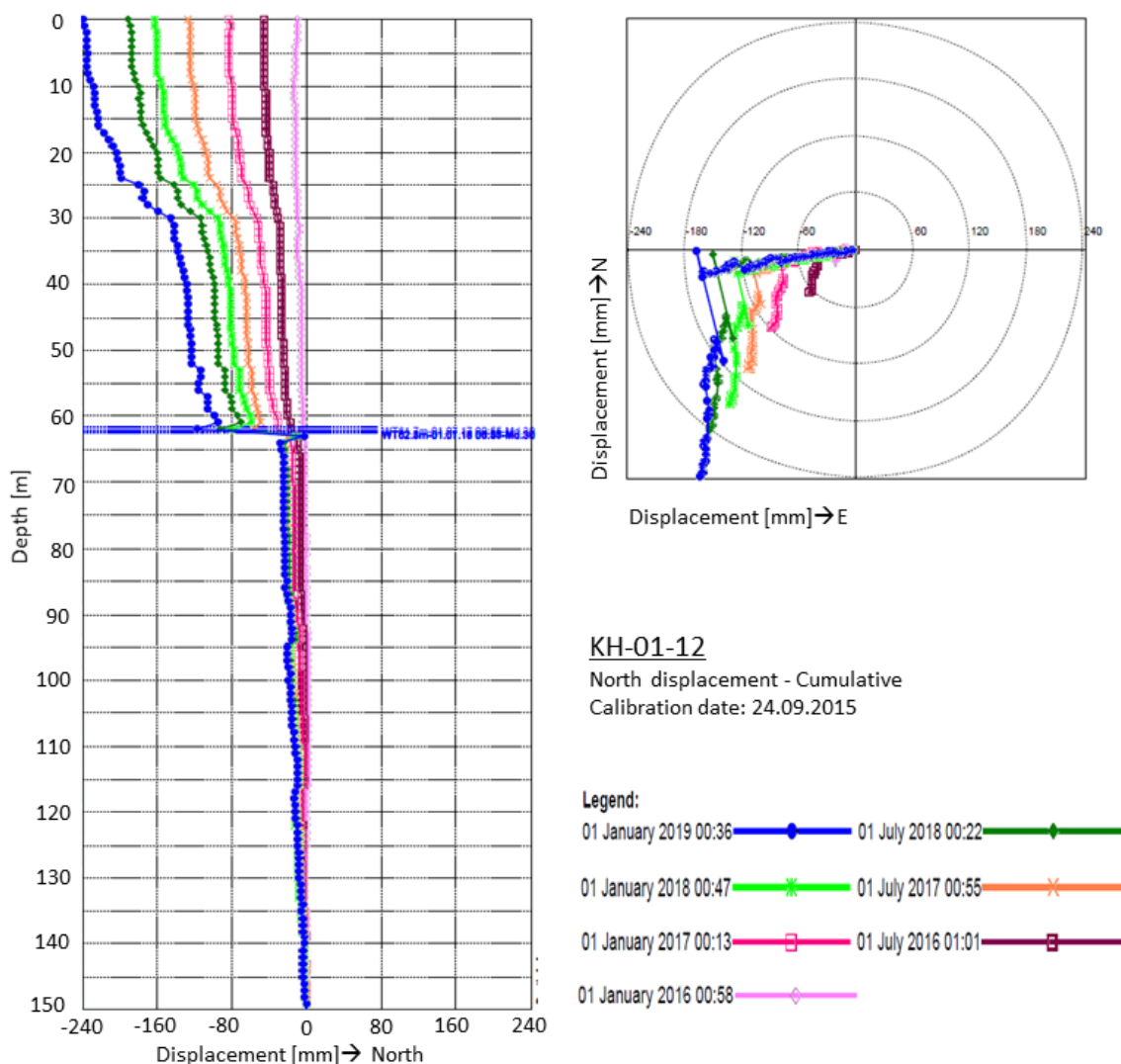
7.5 Glideplan i KH-01-12

KH-01-12 ble kjerneboret i 2012. Borehullet er 200 meter dypt og lokalisert ved nye øvre boreplass, se figur 7.1.

7.5.1 Identifisering av glideplan

DMS-kolonnen i borehull KH-01-12 strekker seg 150 meter ned i borehullet, og har en måleperiode fra 24.09.2015 til 29.01.2019. Grafen til venstre i figur 7.10 viser forskyvning

i nordlig retning. Det er valgt å vise i nordlig retning da dette ga det tydeligste bilde av hvor bevegelsene ligger. Det henvises til vedlegg C for mer informasjon om grafene.



Figur 7.10: Grafen viser forskyvning mot nord og grunnvannsnivået i borehullet. Polplottet til høyre indikerer i hvilken retning bevegelsen skjer. Origo indikerer bunnen av borehullet. Modifisert av forfatter etter (NVE, 2019).

Det er identifisert fem soner med bevegelse og en oversikt over disse finnes i tabell 7.4. Bevegelsen er størst i sone 4 (60-63 m) og det er her registrert en bevegelse på 171 mm i løpet av måleperioden. Det antas at hovedglideplanet befinner seg her. Mindre tydelige glideplan påvirker også dataene fra DMS-systemet. Dette ser man ved 24-25 m, 27-29, 52-59m og 94 m. Langs hele DMS-kolonnen har det vært en total forskyvning på 298 mm i måleperioden. Den totale forskyvningen på grunn av de identifiserte glideplanene er 263 mm. Den blå linjen i grafen til venstre i figur 7.10 viser grunnvannsnivået. Denne ligger på 62.5 meter, på samme område som den største bevegelsen.

Til høyre i figur 7.10 vises retningen til bevegelsen. Origo viser bunn av DMS kolonnen. Det vil si at den nedre delen av borehullet har en retning mot sør-vest (N260Ø), mens den øvre delen har en retning sør (N190Ø).

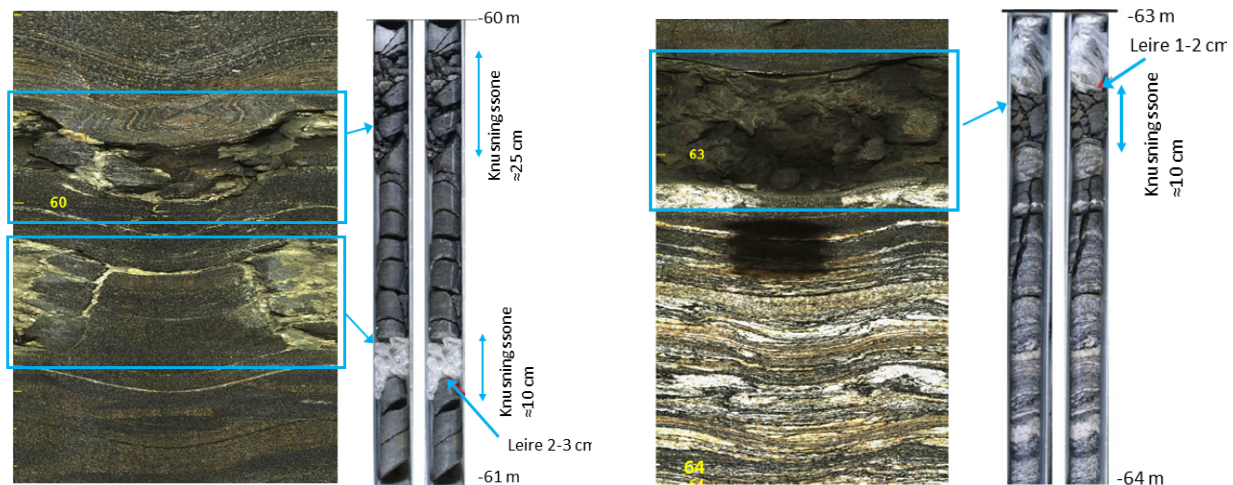
Tabell 7.4: Oversikt over soner med bevegelse i borehull KH-01-12.

	Dybde DMS-kolonne [m]	Sone	Dybde glideplan [m]	Forskyvning [mm]	Omtrentlig retning	Måleperiode
KH-01-12	150	1	24-25	19	Nedre: N260Ø Øvre: N190Ø	24.09.2015 - 29.01.2019
		2	27-31	33		
		3	52-57	16		
		4	61-63 (h)	163		
		5	94	14		

7.5.2 Beskrivelse av bergmassen og sprekkeparameterne

Ganerød (2013) beskriver bergarten som en gneis som varierer mellom granittisk gneis, diorittisk gneis og amfibolittisk gneis. Bergarten er foliørt, stedvis også sterkt foldet. Bergarten er rik på glimmer i den granittiske og diorittiske gneisen, mens kloritt dominerer i den amfibolittiske (Ganerød, 2013).

Den største glidesonen befinner seg ved 60-63 meter (sone 4). Ved 60,77 m, i grensen mellom diorittisk og granittisk gneis ligger en knusningssone med påfølgende leirelag på omtrent 2-3 cm, se figur 7.11. Ved 63,15 meter finnes en leirsone på 1-2 cm, over en knusningssone på 10 cm, også i grensen mellom diorittisk og granittisk gneis, se figur 7.12.



Figur 7.11: Det øverste området viser en knusningssone på omtrent 25 cm. Under vises en knusningssone på 10 cm over en leirsone på 2-3 cm. Bilde fra NVE (2019).

Figur 7.12: En leirsone på 1-2 cm over en knusningssone på omtrent 10 cm ligger i overgangen fra diorittisk gneis til granittisk gneis. Bilde fra NVE (2019).

Ganerød (2013) antar at den tykkeste leirsonen ved 60,77 meter absorberer mest bevegelse og kan beskrives som et glideplan. I kjerneloggen gis disse sonene ved 60,77 og 63,15 meter sprekkefyllingstall (J_a) på henholdsvis 13 og 10. Det vil si leirsoner. Samtidig har de en ruhet (J_r) på 1, noe som betyr at leirfyllingen er tykk nok til å forhindre bergkontakt. Dette tyder på at disse sonene har redusert friksjon. Samtidig er området svært oppsprukket med lav RQD og høy sprekkefrekvens.

7.6 Glideplan i KH-03-06 og KH-02-06

Siden kjerneborehull KH-03-06 og KH-02-06 har begrenset grunnlag i form av kjernebilder og televierbilder blir disse ikke vurdert videre. Under vil det bare bli gitt informasjon fra inklinometermålingene fra DMS i de to borehullene.

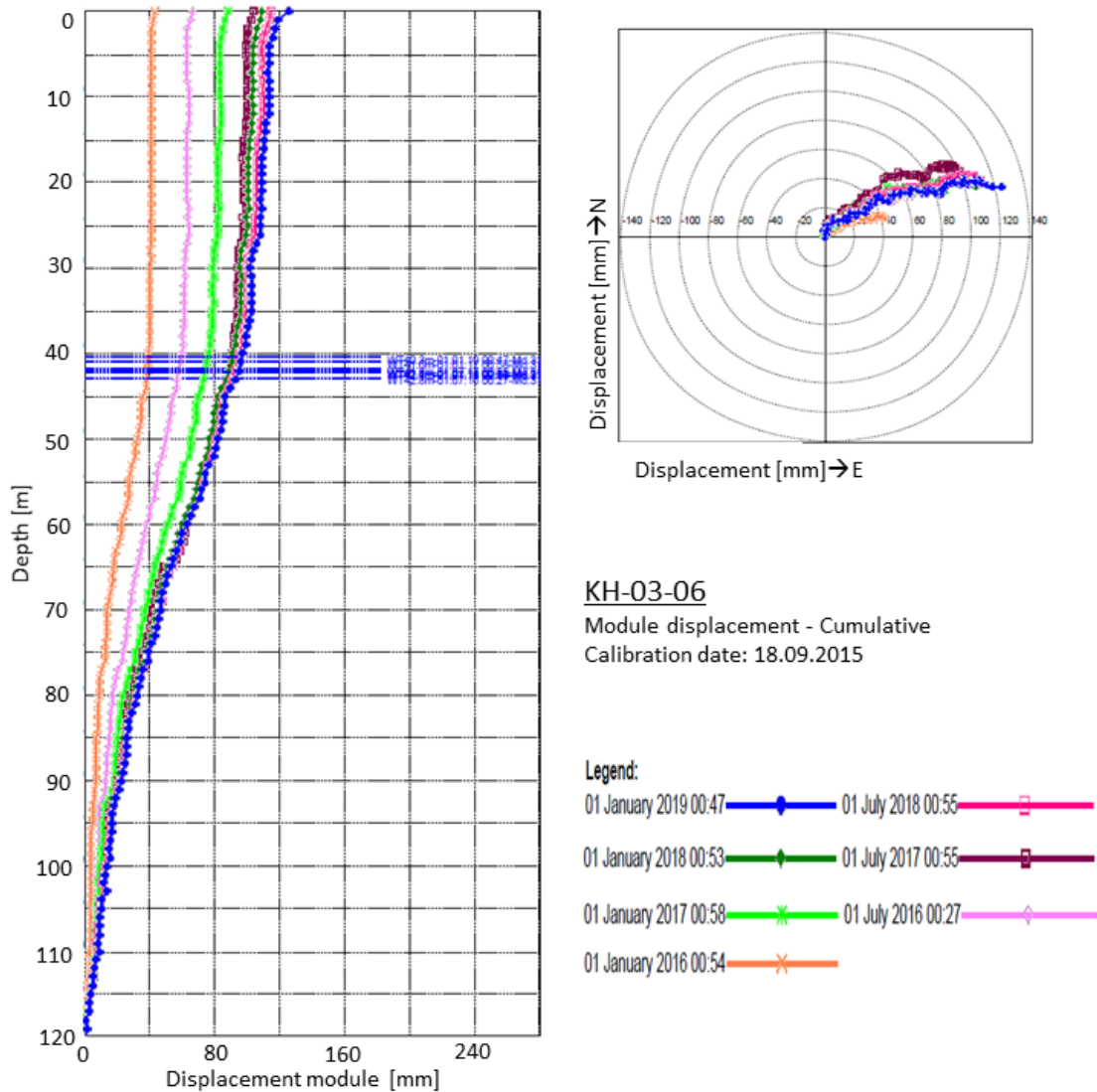
7.6.1 Identifisering av glidesoner i KH-03-06

Kjerneborehull KH-03-06 ble kjerneboret i 2006. Borehullet er 198 meter dypt og lokalisert ved nedre boreplass, se figur 7.1.

DMS-kolonnen ble installert i 2015, og målingene er gjort mellom 18.09.2015 - 29.01.2019. Kolonnen strekker seg ned til 120 meter ned i borehullet.

DMS målingene viser ingen tydelige glideplan. Grafen til venstre i figur 7.13 viser total kumulativ forskyvning og indikerer en lav og jevn bevegelse langs borehullet. Det henvises til vedlegg C for mer informasjon om grafene. Mellom omtrent 42-84 meter viser grafen likevel noe større bevegelse. Dette kan indikere kryp i bergmassen og at det sakte siger i nord-østlig retning som vist på polplottet til høyre i figur 7.13. Kjerneloggen viser ingen tegn til mer oppknust berg eller annen åpenbar årsak til kryp.

DMS målingene viser et tydelig kryp, mens GPS viser liten eller ingen bevegelse i den nedre delen av skredområdet. I tillegg viser polplottet fra DMS at bevegelsen skjer i nord-øst retning. Dette indikerer altså at bevegelsen skjer på skrått, oppover fjellsiden og ikke ned mot fjorden som de andre målingene viser. GPS og DMS målinger er samsvarende i de øvre delen av Åkneset, så det undersøkes om det kan være målefeil ved DMS (Langeland, 2019d).



Figur 7.13: Total forskyvning langs borehullet, viser bevegelse (kryp) i nord-øst retning. Modifisert av forfatter etter (NVE, 2019).

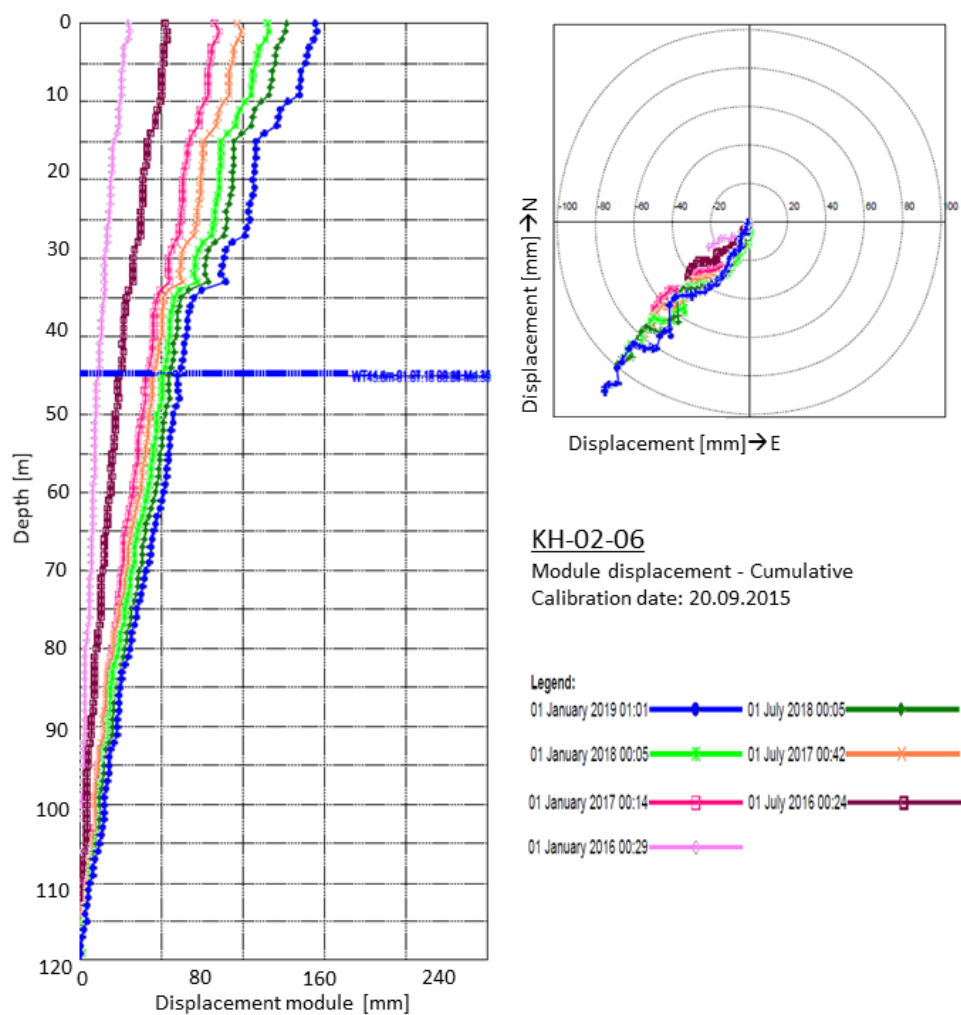
7.6.2 Identifisering av glidesoner i KH-02-06

Borehull KH-02-06 ble boret i 2006. Borehullet er 202 meter dypt og lokalisert ved midtre boreplass, se figur 7.1. DMS-kolonnene ble installert i 2014, og har måleverdier fra 20.09.2015 til 29.01.2019. Kolonnen strekker seg 120 meter ned i borehullet.

Grafen til venstre i figur 7.14 viser kumulativ total forskyvning. Det henvises til vedlegg C for mer informasjon om grafen. Denne indikerer tre soner med bevegelse og en oversikt over sonene finnes i tabell 7.5.

Grafene viser at bevegelsessonene ligger rundt 13-15 meter, 27-29 meter og 32-35 meter. Den

dypeste sonen viser størst bevegelse med 40 mm forskyvning i måleperioden. Retningen til bevegelsen er i sør-vest retning som vist i polplottet i figur 7.14.



Figur 7.14: Total forskyvning langs borehull KH-02-06, viser bevegelse i sør-vest retning. Modifisert av forfatter etter (NVE, 2019).

Tabell 7.5: Oversikt over soner med bevegelse i KH-02-06.

	Dybde DMS-kolonne [m]	Sone	Dybde glideplan [m]	Forskyvning [mm]	Omtrentlig retning	Måleperiode
KH-02-06	120	1	13-15	24	N216E	20.09.2015- 25.10.2018
		2	27-29	28		
		3	32-35	40		

7.7 Oppsummerende bemerkninger

I dette kapitlet har soner med bevegelse blitt identifisert, og det antas at det ligger mulige glideplan i disse sonene. Det er forsøkt å finne igjen sonene med bevegelse på televierbilder og kjernebilder for å i større grad kunne verifisere at dette er glideplan. Enkelte bilder ga ingen tydelig indikasjon på bevegelse, mens andre har vist strukturer som kjernetap, knusningssoner og leirsoner som forsterker teorien om at det har vært bevegelse i området. Videre i kapittel 8 er de antatte glideplanene tegnet inn i profiler.

Analysen viser at bevegelsene stedvis forekommer i områder med en mørk og finkornet gneis, gjerne i grensen til den mer lyse og grovkornete gneisen. På grunn av linken mellom den mørke og finkornete bergarten og skjærsoner er det valgt å teste denne bergarten på laboratoriet for å undersøke materialegenskapene og skaffe parametere til NGIs numeriske analyse.

Tolkning av glideplan i profiler

I dette kapitlet er de identifiserte glideplanene fra kapittel 7 tegnet inn i profilene presentert i figur 5.3.

8.1 Tolkning av glideplan

8.1.1 Metode

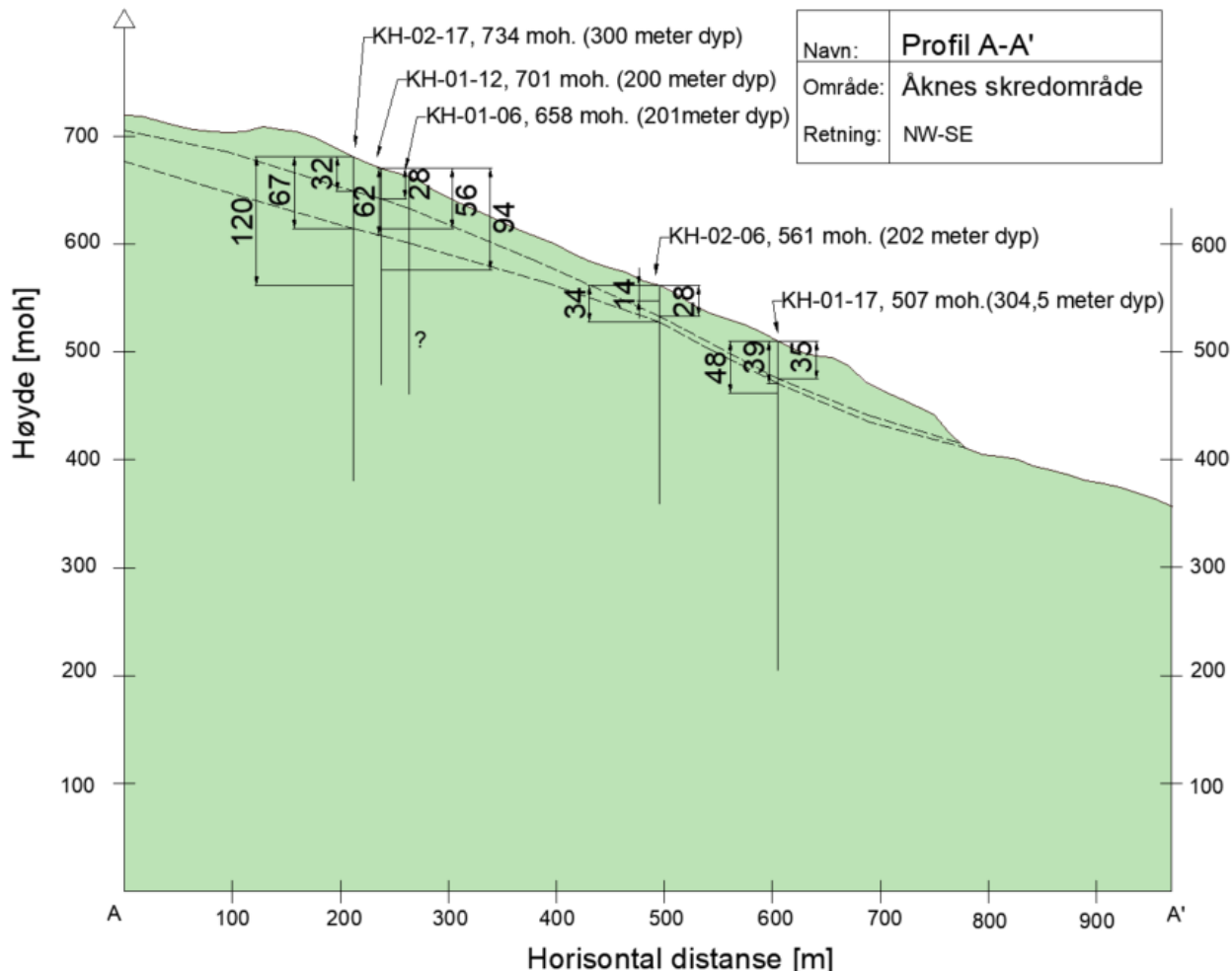
Ved hjelp av DMS-målinger er det registrert hvor i borehullene bevegelse forekommer og det er antatt at glideplan befinner seg her. En oversikt over disse sonene finnes i tabell 7.1.

Profilene er de samme som presentert tidligere i oppgaven i figur 5.3. Som nevnt er terrengprofilen hentet fra Åknesprosjektets ArcGIS fil og overført til AutoCAD. Her er borehullene langs profilene tegnet inn. For de borehullene med DMS er dyp til glideplanene indikert. Deretter er glideplanenes forløp tolket mellom borehullene. I de borehullene uten DMS er dyp til glideplan antatt ut fra forholdene i resten av profilet. Skredets fot er antatt å samsvare med skredområdets totale begrensning indikert i figur 5.3.

8.1.2 Resultat av tolkningen

Resultatet av profilene kan man se i figur 8.1-8.4.

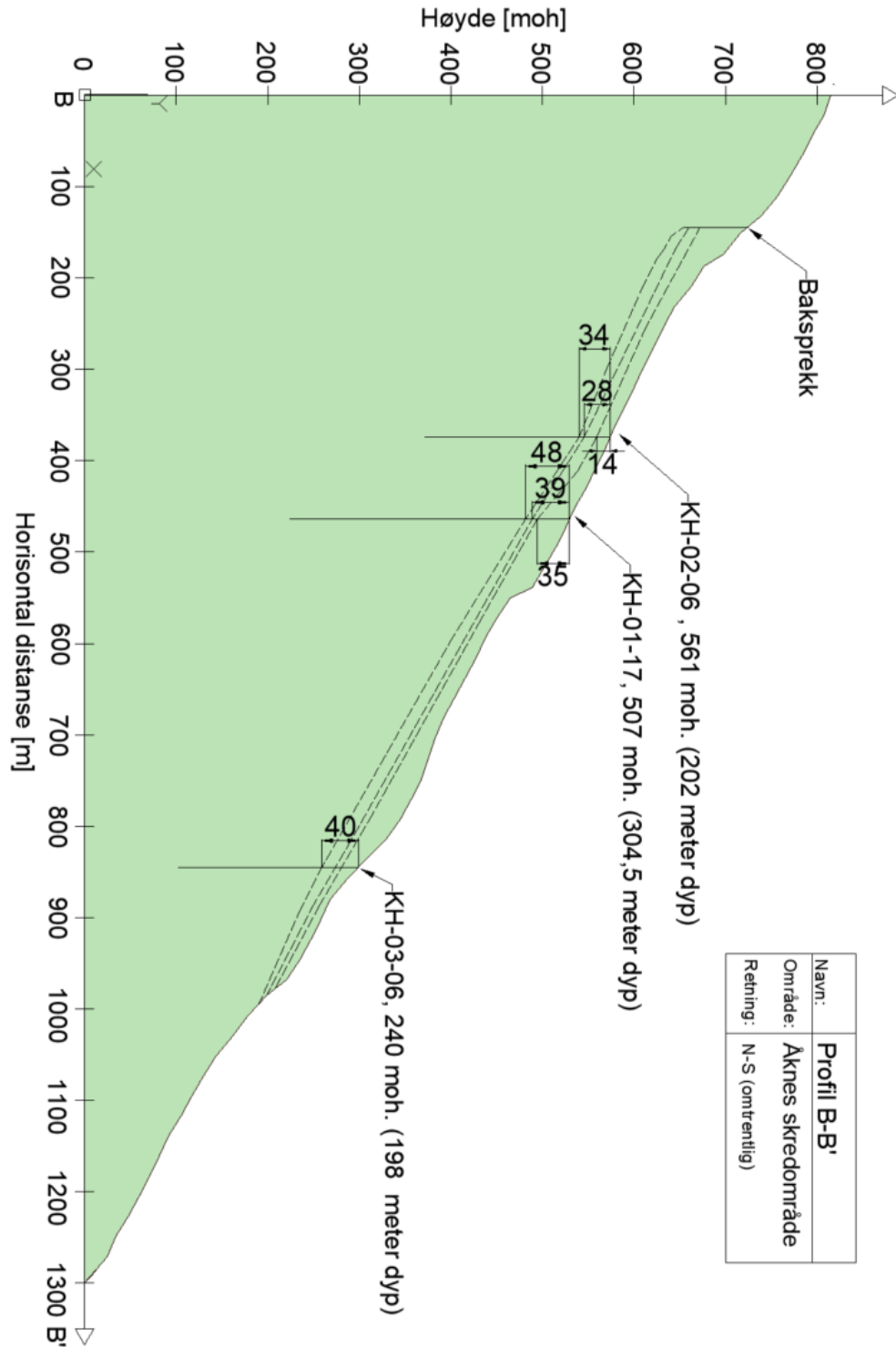
Profil A-A' ligger i omtrent NV-SØ retning. Her er det DMS-målinger i alle borehullene bortsett fra KH-01-06. Det er valgt å tegne inn to sammenhengende glideplan på forholdsvis grunne dyp, se figur 8.1. Det er også registrert dypere bevegelser på 120 meter og 94 meter i henholdsvis borehull KH-02-17 og KH-01-12.



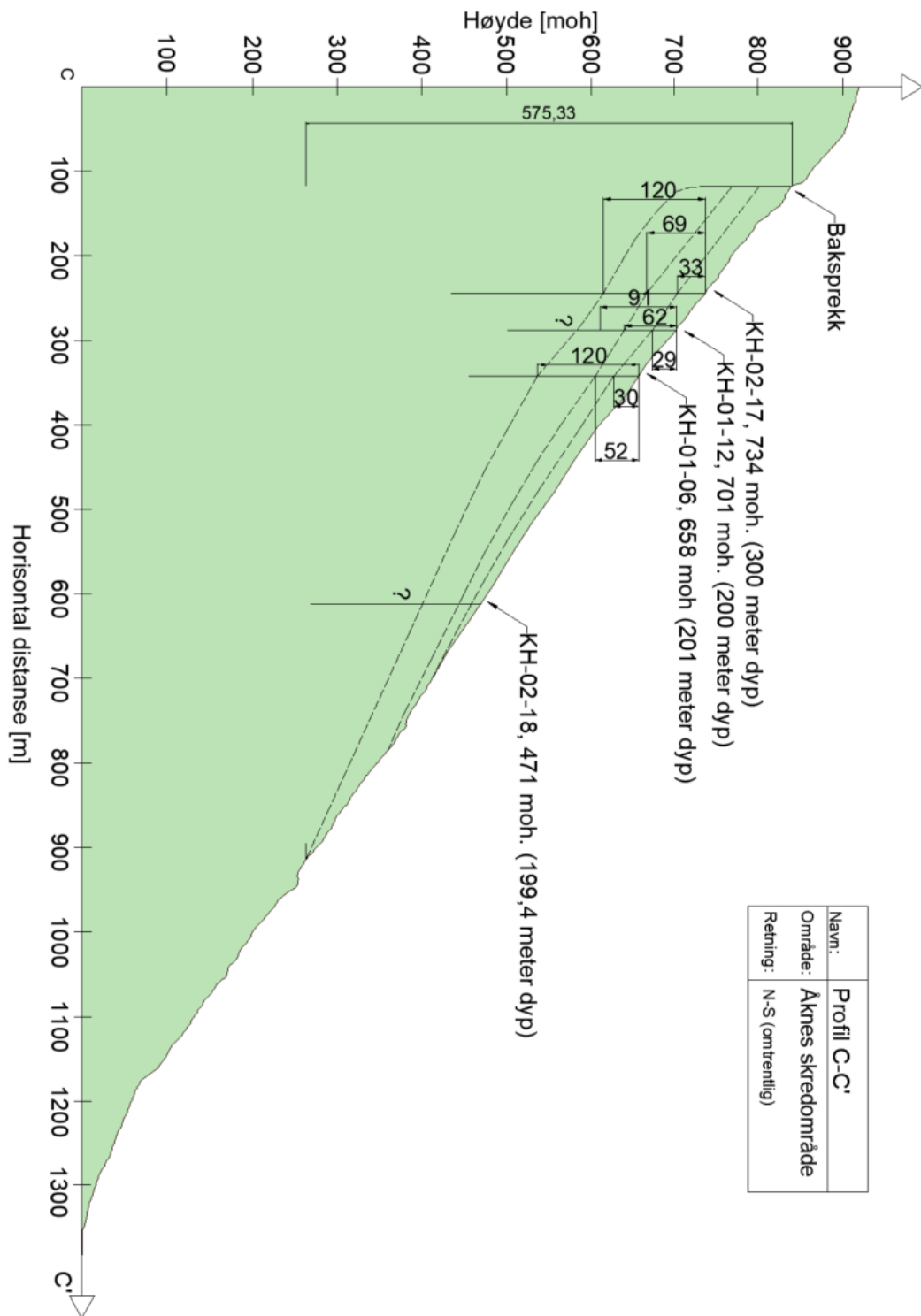
Figur 8.1: Profil A-A' strekker seg i NV-SØ retning. Det er valgt å tegne inn to glideplan.

Profil B-B' strekker seg i omtrent nord-sør retning parallelt med skråningens fall, se figur 8.2. Alle tre borehullene i dette profilet har DMS. Det er tegnet inn tre tette og forholdsvis grunne glideplan med lav overdekning. Glideplanene er også tegnet inn i KH-03-06, selv om dette borehullet har vist et jevnt kryp og ingen tydelige glideplan på DMS-målingene.

Profil C-C' strekker seg i omtrent nord-sør retning parallelt med skråningens fall, figur 8.3. Fire borehull er tegnet inn. Tre av disse har DMS-målinger, mens borehull KH-01-18 blir installert med DMS sommeren 2019. Tre glideplan er tegnet inn, ett grunt på omtrent 30 meter, ett mellom 60-70 meter og ett rundt 120 meter på det dypeste.

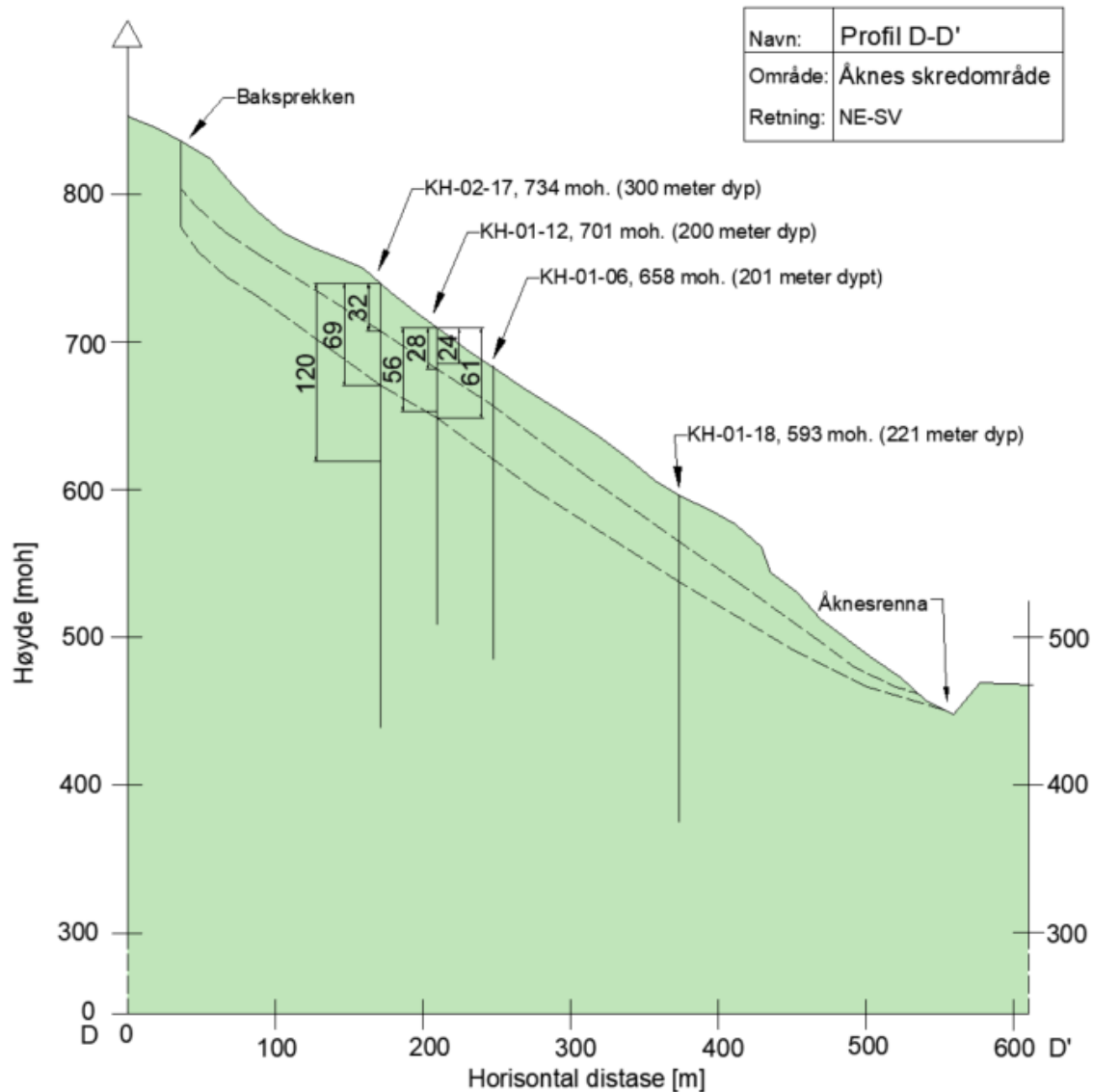


Figur 8.2: Profil B-B' består av tre borehull med installerte DMS-kolonner. Tre glideplan på forholdsvis grunt dyp er tegnet opp.



Figur 8.3: Profil C-C' ligger i omtrent N-S retning parallelt med skråningens fall. Fire borehull er tegnet inn. Borehull KH-02-18 skal bli instrumentert med DMS sommeren 2019.

Profil D-D' ligger i NV-SØ retning med helning mot Åknesrenna. Dette profilet består av fire borehull der tre av disse har DMS. Borehull KH-01-18 blir installert med DMS sommeren 2019. To glideplan er tegnet inn, ett med omtrent 30 meters overdekning og ett med omtrent 60-70 meters overdekning.



Figur 8.4: Profil D ligger i omtrent NV-SØ retning med helning mot Åknesrenna. Profilet består av fire borehull. Borehull KH-01-18 blir instrumentert med DMS kolonne sommeren 2019.

8.2 Oppsummerende bemerkninger

Når det gjelder baksprekken er dypet på denne ikke sikkert definert. Den er dypere og mer markant i vest enn i øst. Dybden på baksprekken er bare tilpasset tolkningen av glideplanene.

I og med at borehull er endimensjonale, har man blitt nødt til å interpolere og tolke hvordan disse glideplanene strekker seg i bergmassen. Åkneset er som tidligere nevnt et komplekst system og disse profilene vil på ingen måte kunne beskrive kompleksiteten i skredområdet. Glideplanene er tegnet som flere sammenhengende glideplan med rette linjer. I virkeligheten kan disse være undulerende og avskåret av broer av intakt berg. Enkelte glideplan kan også nå dagen mye høyere oppe i fjellsiden. Likevel er det viktig å prøve å plassere informasjonen på kart og profiler for å forsøke å visualisere hvordan dette ser ut.

Laboratorietesting

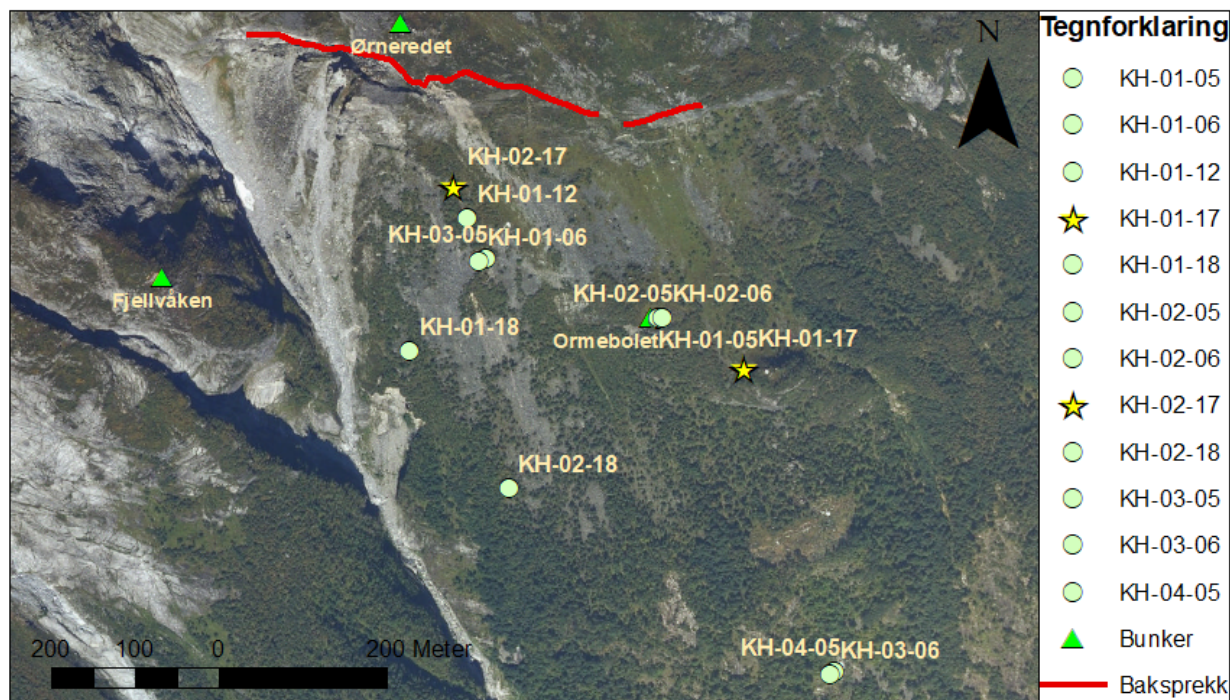
Følgende kapittel omhandler de utførte laboratorietestene. Testene er gjennomført på NTNU/Sintefs bergmekaniske laboratorium. Formålet med testingen har vært å finne materialets bergmekaniske egenskaper og inngangsparametere for numerisk analyse. I den forbindelse er det gjennomført enaksialtesting, treaksialtesting, måling av lydshastighet og tetthet, tilttesting og XRD-analyse. Hovedoppgaven blir å utføre treaksialtesting som ikke har blitt utført på dette materialet tidligere og gjøre XRD-analyse for å se på mineralinnholdet, spesielt med tanke på glimmer.

9.1 Informasjon om materiale

9.1.1 Lokasjon og prøvemateriale

Ut fra kartleggingen av glidesonene i kapittel 7 ble det lagt merke til at bevegelsen ofte skjer i forbindelse med den mørke og finkornete gneisen. Derfor var det ønskelig å teste denne bergarten som framsto som en svakere bergart med høyere oppsprekking og glimmerinnhold. Ut fra analysen gjort i kapittel 7, og vurdering gjort i samråd med NGI ble det bestemt områder som var ønskelig å teste. Kjerneprøver ble tatt ut fra én sone i borehull KH-01-17 og én sone i borehull KH-02-17. Lokasjonen til disse borehullene er markert med stjerne i figur 9.1.

En oversikt over de valgte områdene og på hvilke dyp de ulike kjernene er hentet, finnes i tabell 9.1. Bilde av kjerneprøvene i kjernebassene og de gitte nummereringene vises i figur 9.2 og 9.3.



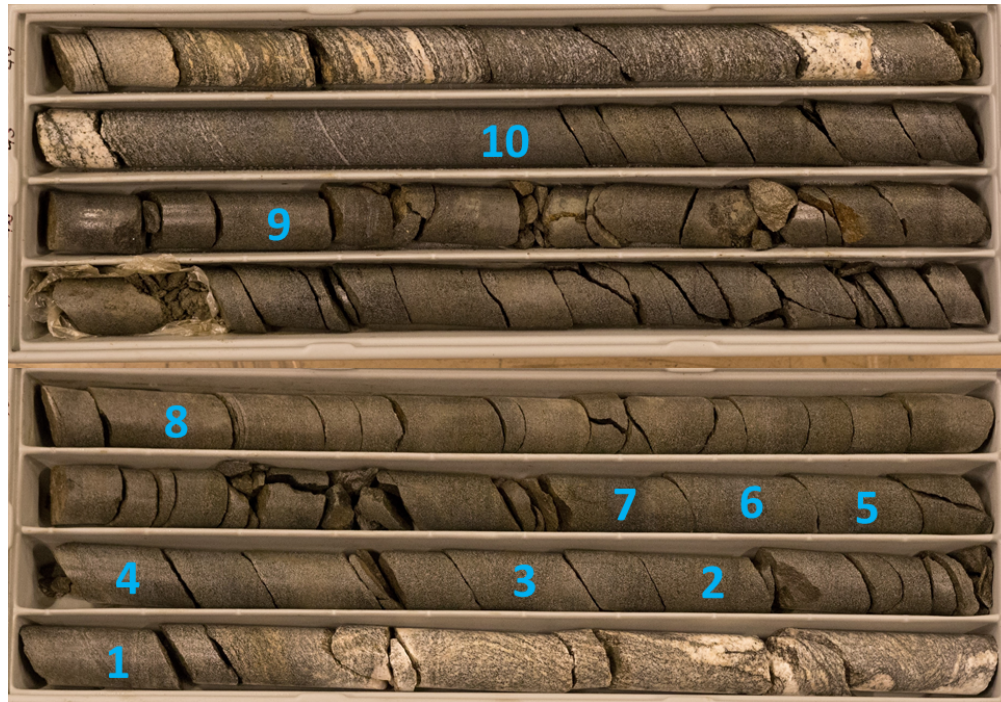
Figur 9.1: Gule stjerner indikerer lokasjonen til KH-01-17 og KH-02-17. Kjerner fra disse borehullene blir benyttet til laborrietesting.

Tabell 9.1: Tabellen viser hvilket borehull, prøvens nummerering og hvor dypt i borehullet kjerneprovne er hentet. Kjernene med to nummereringer er delt i to.

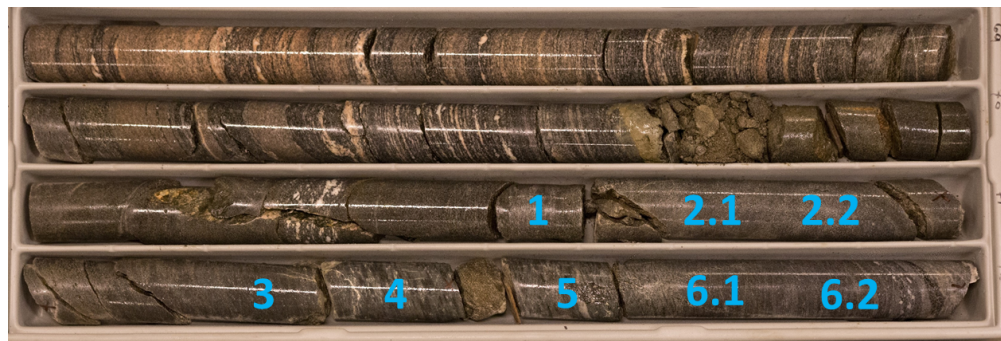
KH-01-17 <i>Kjerneprovner</i>						
Prøve	1	2	3	4	5	6
Seksjon (m)	36,87-37,00	37,24-37,37	37,44-37,57	37,86-38,00	38,09-38,20	38,20-38,33

Prøve	7	8	9	10		
Seksjon (m)	38,33-38,45	39,81-39,95	41,71-41,82	42,43-42,92		

KH-02-17 <i>Kjerneprovner</i>						
Prøve	1	2 (2.1 og 2.2)	3	4	5	6 (6.1 og 6.2)
Seksjon (m)	70,40-70,49	70,54-70,83	71,0-71,21	71,21-71,40	71,40-71,52	71,52-71,9



Figur 9.2: Viser hvor i kjerneboksene de ulike prøvene fra KH-01-17 er tatt ut.



Figur 9.3: Viser hvor i kjerneboksene de ulike prøvene fra KH-02-17 er tatt ut.

Prøvene ble plukket ut av Gustav Pless ved NVE i Stranda og sendt til Bergmekanisk laboratorium ved Institutt for geovitenskap og petroleum. Prøvene som skulle til bergmekanisk testing ble preparert og testet av Gunnar Vistnes og undertegnede, med hjelp fra Jon Runar Drotninghaug. XRD analyse ble gjennomført sammen med Laurentius Tjihuis ved kjemisk-/ mineralogisk laboratorium.

En oversikt over testene som er utført finnes i tabell 9.2. Hovedsakelig utføres treaksialtesting på KH-01-17 og enaksialtesting på KH-02-17, mens lydshastighet og tetthet gjennomføres som en standard ved alle laboratorieforsøk. XRD og tilttest ble utført for begge lokasjonene.

Tabell 9.2: Oversikt over hvilke tester som skal gjennomføres på de ulike prøvematerialene, antall kjerner og deres lengde og diameter (d).

Metode	Undersøkelse av	Kjerner fra KH-01-17	Kjerner fra KH-02-17
Tetthet og lyd hastighet	Tetthet og lyd hastighet	10 kjerner, $d=40$ mm, lengde $\approx 2,5*d$	6 kjerner, $d=40$ mm, lengde $\approx 2,5*d$
Tilttest	Basis friksjonsvinkel	9 kjerner, $d=40$ mm, lengde $\approx 2,5*d$	6 kjerner, $d=40$ mm, lengde $\approx 2,5*d$
Treaksilatest	Friksjonsvinkel, kohesjon og Hoek-Brown konstanten (m_i)	9 kjerner, $d=40$ mm, lengde $\approx 2,5*d$	-
Enaksialtest	Enaksiell trykkfasthet, E-modull og Poissons forhold	-	5 kjerner, $d=40$ mm, lengde $\approx 2,5*d$
XRD	Mineralinnhold og svellende leirer	Prøvemateriale fordelt på 3 XRD prøver	Prøvemateriale fordelt på 1 XRD prøve

9.2 Teori og metode

I dette delkapittelet blir teori og metode for de ulike laboratorietestene gitt. Testene er utført etter ISRM standarden. Ved avvik er disse gitt under metode.

9.2.1 Tetthet og lyd hastighet

Teori og metode

Lyd hastigheten brukes til å finne informasjon om den generelle karakteren til bergarten. En sender og mottaker plasseres mot hver av de to plane flatene på prøvestykket. Ultralydvæske påføres sender og mottaker for å sikre god kontakt til berget. En høyfrekvent puls, S- eller P-bølger sendes gjennom prøvestykket og gangtiden (t) mellom sender og mottaker registreres i millisekund (ISRM, 1978b). Ved å måle kjernens lengde (s) kan man finne bølgenes hastighet (v) ved å dividere på gangtiden, se ligning (9.1).

$$v = \frac{s}{t} \quad (9.1)$$

Tettheten bestemmes ut fra tyngden og volumet til prøvene. For hver prøve registreres vekt, diameter og lengden målt i laboratoriet. Vekten registreres både i tørr og vannmettet tilstand. Tettheten regnes så ut fra ligning (9.2), der ρ er densiteten, m er massen og V er volumet til prøven.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9.2)$$

9.2.2 Tilttest

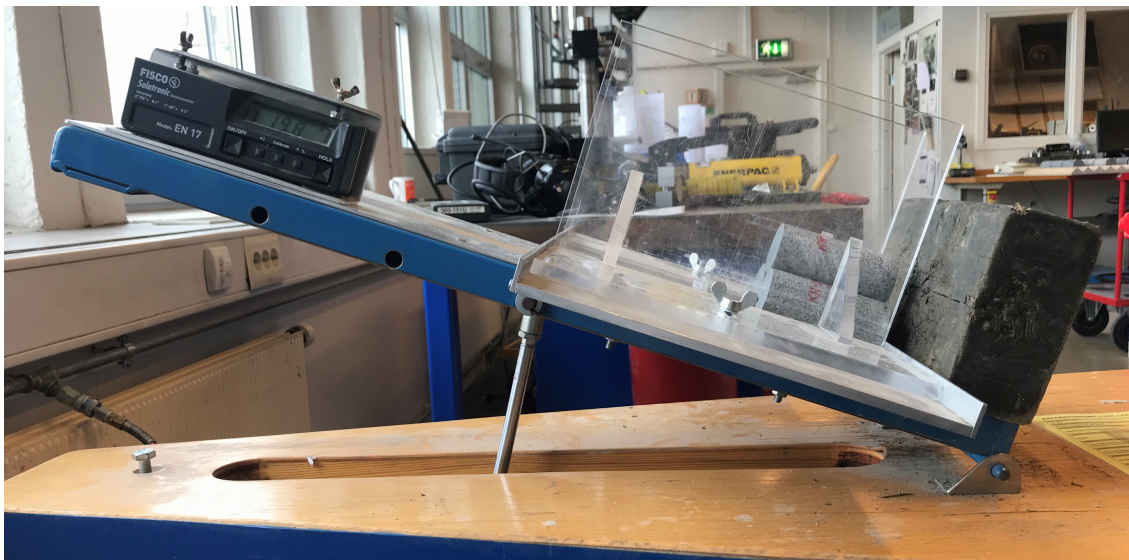
Teori

Tilttest benyttes for å finne bergartens basis friksjonsvinkel (ϕ_b). Friksjonsvinkelen benyttes i stabilitetsanalyser og når skjærstyrken til diskontinuiteter skal bestemmes (Grøneng og Nilsen, 2009).

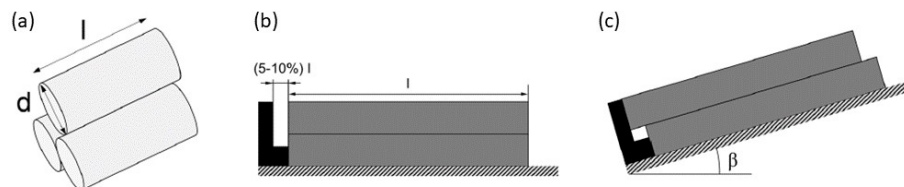
Ved bruk av kjerneprøver bør disse ha lengde-diameterforhold på 2,5 eller større. Lengden på kjernene bør være minst 50 mm for å unngå mangelfull kontakt som følge av irregulareteter i kjernens overflate. Slike irregulareteter har en tendens til å være større når prøven blir mindre (Alejano *et al.*, 2018).

Apparatet som benyttes for å gjennomføre tilttesten (tiltmeter) vises i figur 9.4. Kjernene plasseres i apparatet i horisontal posisjon. Apparatet tilter ved hjelp av en hydraulisk pumpe til den øvre kjernen begynner å gli, se figur 9.5. Her stoppes tiltingen, og tiltvinkelen registreres manuelt ved hjelp av inklinometeret på apparatet. For hver kjerne repeteres dette fem ganger. Basis friksjonsvinkel (ϕ_b) kalkuleres som middelverdien av de registrerte tiltvinklene (Alejano *et al.*, 2018):

$$\phi_b = \text{median} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \tan \beta_{i=1, \dots, 5} \right) \right] \quad (9.3)$$



Figur 9.4: Viser tiltmeteret som benyttes på laboratoriet. Aparatet til venstre er inklinometeret som registrerer vinkelen til tiltmeteret. Foto: Lise Tønset.



Figur 9.5: a) Konfigurasjonen ved bruk av hele kjerneprøver. b) Konfigurasjonen ved start. Kjernen plasseres horisontalt i apparatet. c) Apparaten tilter til den øverste kjernen glir og tiltvinkelen registreres. Modifisert av forfatter etter (Alejano *et al.*, 2018).

Metode

Benyttede kjerner har en diameter på 40 mm som er mindre en anbefalingene i standarden. Det er flere metoder for å gjennomføre tilttest. Her ble det benyttet metoden for bruk av tre kjerner med en konfigurasjon som illustrert i figur 9.5(a). Testen utførtes på tørre kjerner.

Tre kjerner (en serie) med omtrent samme lengde ble plassert som vist i figur 9.5(a). Testen ble repetert fem ganger, før kjernene ble rotert slik at en ny kerne ble plassert på toppen. Dette gir 15 målinger per serie. Totalt ble det 45 målinger for KH-01-17 (9 kjerner), og 30 målinger for KH-02-17 (6 kjerner). Ved utregning av basis friksjonsvinkel ble medianen brukt for å hindre feil som følge av uteliggere.

9.2.3 Enaksiell trykkfasthet

Teori

Ved enaksialtesting benyttes sylindriske kjerneprøver med en diameter på 54 mm, og en lengde på 2,5-3 ganger diameteren. Endene på prøvene skal være flate og de vinkelrette sidene skal være rette og glatte. Testen bør gjennomføres på minst fem prøver (ISRM, 1979).

Aksiell last påføres kontinuerlig med en konstant spenningsrate. I denne testen er kompresjon positiv. Tøyningen og lasten settes opp i et koordinatsystem slik at en spenning-tøyningskurve oppstår. Herfra vil man kunne finne enaksiell trykkfasthet (σ_{ci}), E-modulus (E) og Poissons forhold (ν), som beskrevet i kapittel 3.1.

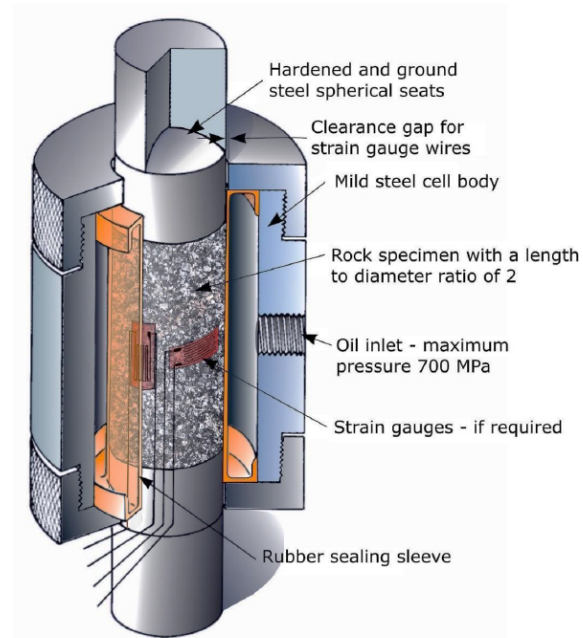
Metode

Kjernene som testes har en diameter på 40 mm som er mindre enn standardens krav. Fem tester ble utført for KH-02-17. Kjernene ble vannmettet og påført en plaststrømpe for å unngå uttørking.

Tangent-modulus ved spenningsnivå 50% av σ_{ci} ble benyttet ved utregning av E-modul og Poissons forhold (ISRM, 1979). Konfigurasjonen ved enaksialtesten vises i figur 9.6.



Figur 9.6: Konfigurasjonen ved enaksial trykktest. Her vises kjernen med monterte tøyningmålinger før den skal bli trykksatt aksielt. Foto: Lise Tønset.



Figur 9.7: Ved treaksialtesting brukes de samme måleinstrumentene som for enaksial testing. Forskjellen er at kjernen settes inn i en såkalt Hoek celle som trykkesett med olje til et gitt omslutningstrykk. Bilde hentet fra (Hoek, 2000)

9.2.4 Treaksialtest

Teori

Ved enaksialtesting testes bergartens styrke i én spenningsretning. Ved treaksial testing blir kjernen påført et omslutningstrykk slik at $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Økt omslutningstrykk gir høyere bergartsstyrke (Li, 2017). Hensikten er å teste styrken til bergartsprøver som en funksjon av omslutningstrykket.

Prøvestykket skal være sirkulære sylindere med lengde-diameterforhold mellom 2,0 og 3,0. Diameteren skal være omtrent 54 mm. Endene på prøvestykket skal være rette og vinkelrett på lengdeaksen. Sidene på prøvestykket skal være glatte og rette. Gjennomsnittlig diameter, av seks målinger, brukes til å regne ut tverrsnittarealet. Prøver bør testes med deres naturlige

fuktighet. Antall prøver bør være tilstrekkelig til å kunne bestemme bruddkurven over de ulike omslutningstrykkene og er avhengig av testmetoden, bergmassens variasjon og bruken av dataene (ISRM, 1983).

Kjerneprøven monteres likt som for enaksiell trykktest, se figur 9.6, og plasseres deretter i et apparat som kalles Hoek celle, figur 9.7. Den sylindriske kjernen plasseres i cellen som trykkes med olje til et bestemt omslutningstrykk σ_3 . En gummistrømpe brukes for å isolere prøven mot oljen og for å holde kjernen mer intakt etter brudd. Før testen starter påføres aksiell last og omslutningstrykk til valgt nivå. Deretter holdes omslutningstrykket konstant på valgt nivå mens aksiell last økes til kjernen går i brudd (ISRM, 1983).

Metode

Kjernene måtte reduseres i størrelse til 40 mm for å nå kravene om en lengde på 2-3 ganger diameteren. 9 kjerner er testet i 3 serier à 3 kjerner for KH-01-17.

Etter den første kjernen ble testet treaksielt ble det besluttet å kjøre to laststeg på hver prøve for å få flere resultater. Dette gjøres ved å observere når spennings/tøyningskurven bøyer av og er på vei til å gå i brudd. Rett før prøven går i brudd økes omslutningstrykket mens aksiell last fortsetter å øke til prøven går i brudd. Dette gir resultater fra to ulike omslutningstrykk på en enkelt prøve. Serie 1 ble utført som en vanlig enaksiell test for å bestemme enaksiell trykkfasthet (σ_c). Serie 2 ble kjørt med omslutningstrykk 2,5 MPa og 5 MPa, mens serie 3 ble kjørt med 5 og 10 MPa.

Etter testen måles bruddvinkelen, vinkelen mellom lengdeaksen og bruddflaten, ved bruk av tangens. Ved videre behandling av dataene benyttes Mohr- Coulomb og Hoek- Brown som forklart i kapittel 3.2 og programmet RocData.

9.2.5 XRD

Teori

XRD brukes til å identifisere mineralsammensetningen og for å undersøke innholdet av svellende mineraler i prøven.

Prinsippet er at røntgenstråler sendes mot materialet med ulike innfallsvinkler. Strålene reflekteres når de treffer mineralets krystallgitter. Refleksjonen fra de ulike planene i gitterstrukturen vil interferere når gangforskjellen er lik et helt antall bølgelengder (Nilsen, 2016).

Strålene som reflekteres med tilsvarende utfallsvinkel blir registrert. Vinklene korresponderer med ulike gitteravstander som blir registrert i et diffraktogram. Hvert mineral har forskjellige gitteravstander og får derfor et unikt diffraktogram med et mønster som kjennetegner dette mineralet. Ved å sammenligne med en database med kjente mineralmønstre kan mineralene identifiseres (NGU, 2015b).

Metode

Kjernene som viste størst likhet i styrke ble knust sammen for å finne mineralsammensetningen. For KH-01-17 ble det valgt å gjøre tre XRD og én svellestest. For KH-02-17 ble det valgt å utføre én XRD prøve.

For prøver der man ønsker å finne både mineralsammensetningen og innholdet av svellende mineraler kreves to ulike behandlingsmetoder. Derfor deles disse prøvene i to.

For mineralidentifikasjon knuses minimum 10 gram av materiale ned til en fraksjon på 10 μm . Dette males deretter forsiktig med etanol for å få en avrundet kornstruktur. Etanolen avdampes ved 105 °C. Pulverpreparatet plasseres i holder tilpasset røntgenspektrometeret (SVV, 2016). Røntgenstråler fra 3° til 80° registreres.

Prøver som skal testes for svelleleire vaskes for å skille ut finstoffet < 6 μm (Langeland, 2014). Deretter lages én prøve som bare skal tørkes og én prøve som skal behandles med glykol før den tørkes. Behandling med glykol gjør at leirmineralene får en ekspansjon som ikke er reversibel. Dette gjør at røntgenstrålene reflekteres annerledes og en får forskyvninger i diffraktogrammet. Svellende mineraler identifiseres ved forskyvninger i diffraktogrammene når disse sammenlignes. Begge pulverpreparatene plasseres også i røntgenspektrometeret.

9.2.6 Preparering av prøver

Preparering av prøvene var utfordrende. På grunn av kjernenes høye oppsprekking var det vanskelig å finne kjernebiter med en tilstrekkelig lengde til å kunne testes. Prøvenes lave lengde og vissheten om at dette kunne være en meget svak bergart gjorde at ble valgt å støpe fast kjernene før de ble boret ut til 40 mm diameter, se figur 9.8 og 9.9. Opprinnelig diameter på kjernene var 63 mm. Reduksjonen i diameter ble gjort for at lenge-diameterforholdet for enaksial- og treaksialtesten skulle være innfridd (ISRM, 1979, 1983).

I henhold til standardene skal enaks- og treakstesting gjennomføres med in-situ fuktighet (ISRM, 1979, 1983). Den svake bergmassen det er valgt å teste ligger i nærheten av glideplanet og grunnvannsspeilet. Med tanke på at prøvene vil være utsatt for en del fuktighet, og tidvis ligge under grunnvannsnivået ble det valgt å vannmette før enaks- og treakstesting. Tetthet og lydshastighet ble funnet for både tørre og vannmettede prøver, mens tilttest ble gjennomført på tørre kjerner.



Figur 9.8: Før boring ble kjernene støpt fast.



Figur 9.9: Kjerner med en diameter på 40 mm bores ut.

9.3 Resultater

Resultatene fra laborietestene har vist store variasjoner, noe som kan gjøre at gjennomsnittsverdiene blir lite representativ for bergmassen. Derfor er det valgt å vise alle resultater for de fleste testene. Kjerneprøvenes mål, lengde og diameter, finnes i vedlegg D.1 og D.4.

Det er valgt å skille resultatene fra de to lokasjonene. Først presenteres resultatene fra KH-01-17 med treaksialtesting, deretter resultatene fra KH-02-17 med enaksialtesting. I tillegg er tiltstest, lydshastighet, tetthet og XRD utført for begge lokasjonene.

9.3.1 Resultater fra KH-01-17

Under vises resultatene fra laborietestene utført på kjernene fra borehull KH-01-17. Det er utført tester på 9 kjerner, se figur 9.10. Prøve nr. 5 er forkastet på grunn av for lavt lengde/diameterforhold.

Tetthet og lydshastighet

Tetthet og lydshastighet til kjerne fra KH-01-17 vises i tabell 9.3. For alle registrerte data henvises det til vedlegg D.1. Lydshastighet og tetthet er beregnet etter ligning (9.1) og (9.2).

Resultatene viser at lyd hastigheten varierer mellom 2447 - 4439 m/s i tørr tilstand, med et gjennomsnitt på 3361 m/s. I vannmettet tilstand er variasjonen mellom 3204 - 5048 m/s, med et gjennomsnitt på 4383 m/s. Den gjennomsnittlige tettheten er henholdsvis 2,81 g/cm³ og 2,82 g/cm³ for tørre og vannmettede kjerner.

Tabell 9.3: Gjennomsnittlig lyd hastighet og tetthet for KH-01-17.

Prøve KH-01-17	Tørr		Vannmettet	
	Lyd hastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]	Lyd hastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]
1	4240	2,79	5047	2,79
2	4439	2,82	5048	2,83
3	3669	2,79	4484	2,80
4	3087	2,85	4203	2,86
6	3086	2,80	4166	2,81
7	2809	2,81	3935	2,82
8	2447	2,78	3204	2,80
9	3491	2,80	4553	2,81
10	2981	2,83	4809	2,84
Gjennomsnitt	3361	2,81	4383	2,82

Tilttest

Basis friksjonsvinkel for kjernene fra KH-01-17 er vist i tabell 9.4. Denne er beregnet etter ligning (9.3), som medianen av totalt 45 utførte tilttester. Alle de registrerte målingene kan finnes i vedlegg D.3. Resultatet viser en basis friksjonsvinkel på 31,9 °.

Tabell 9.4: Resultat av tilttest for KH-01-17

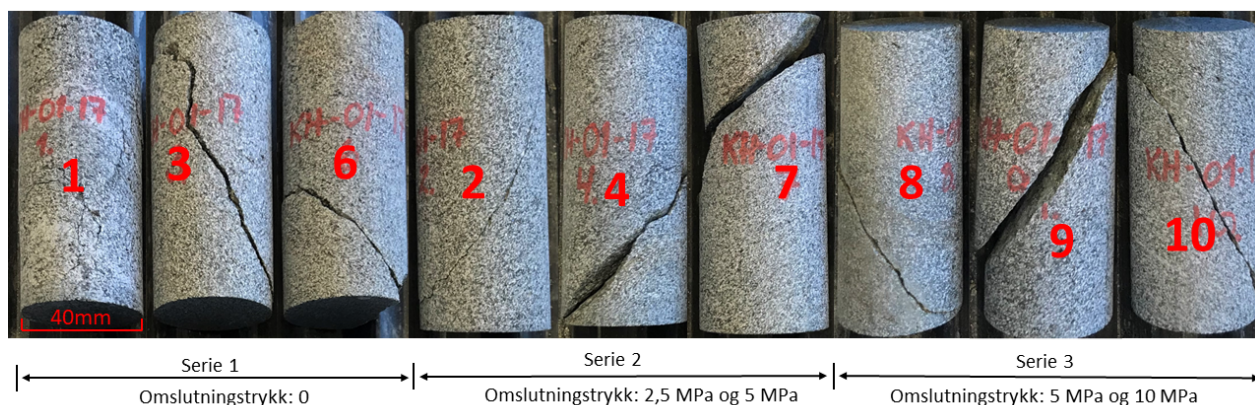
Lokasjon	Basis friksjonsvinkel, ϕ_b
KH-01-17	31,9°

Triaks

Figur 9.10 viser kjerne fra KH-01-17 etter brudd i treaksialforsøket. Her indikeres det også hvilke kjerner som ble testet i samme serie, altså med samme omslutningstrykk. Serie 1 = 0 MPa (enaksielt), serie 2 = 2,5 og 5 MPa og serie 3 = 5 og 10 MPa. Begrunnelse for valg av kjerner i de ulike seriene blir gitt i diskusjonen.

Tabell 9.5 viser resultatene fra treaksialtesten. Spenningen ved brudd (σ_1) er gitt samt det påførte omslutningstrykket (σ_3). E-modul (E) og Poissons forholdstall (ν) ble beregnet ut fra spenning-tøyningskurvene til serie 1 (figur 9.11) og ligning (3.2) og (3.3). Bruddvinkel er målt

på kjernene. For ytterligere informasjon om mål av bruddvinkel og kommentarer angående bruddtype henvises det til vedlegg D.2



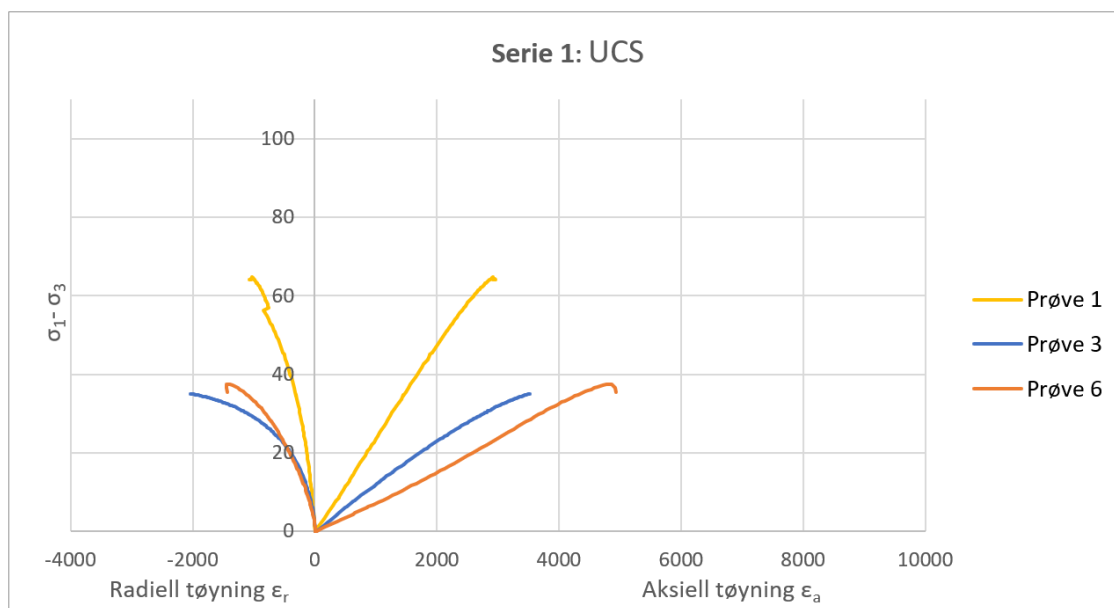
Figur 9.10: Viser kjernene etter utført treaksforsøk. Indikerer også hvilke kjerner som ble testet på de ulike omslutningstrykkene.

Tabell 9.5: Resultater fra treakstesting utført på kjerner fra borehull KH-01-17.

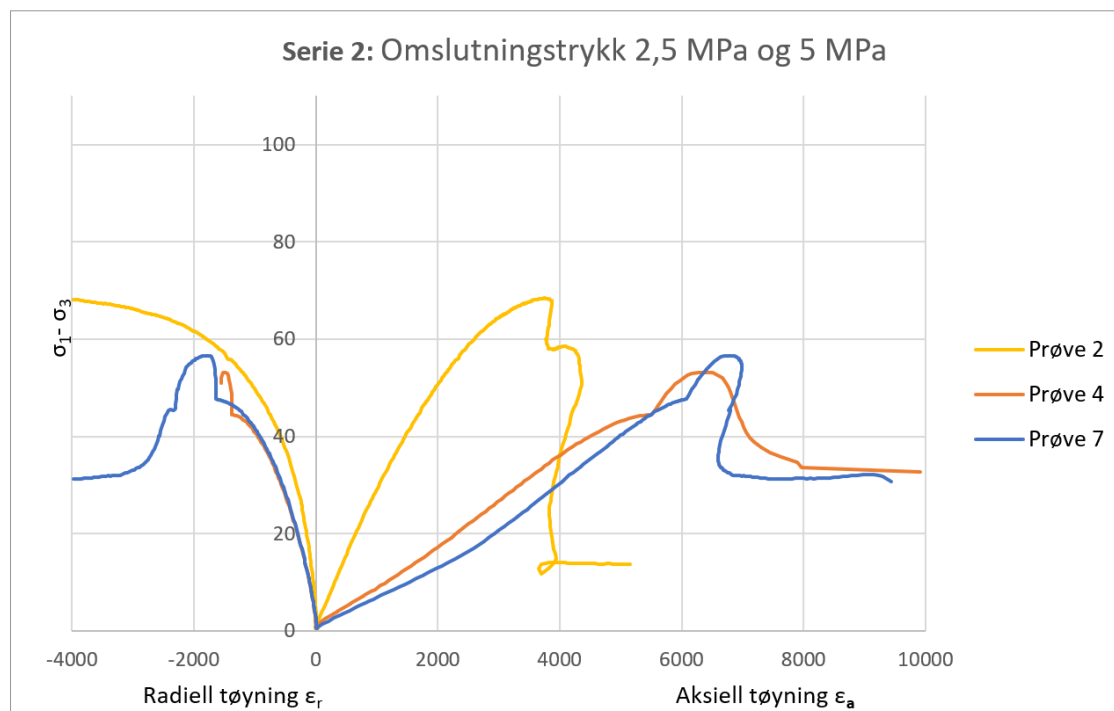
Serie	Prøve nr.	σ_3 [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ [MPa]	σ_1 [MPa]	E [GPa] (lign.(3.2))	ν (lign.(3.3))	Målt bruddvinkel [°]
1	1	0	64,8	64,8	24,34	0,35	27
	3	0	35,5	35,5	10,96	0,41	27
	6	0	37,5	37,5	8,86	0,28	43
2	2	2,5	68,4	70,9	-	-	28
	4	2,5	44,5	47,0	-	-	45
		5	53,2	58,2	-	-	
7	2,5	47,6	50,1	-	-	51	
3	8	5	25,9	30,9	-	-	38
		10	31,3	41,3	-	-	
	9	5	49,9	54,9	-	-	32
		10	64,0	74,0	-	-	
	10	5	91,9	96,9	-	-	28
		10	108,6	118,6	-	-	

Figur 9.11-9.13 viser spenning-tøyningskurven for de tre seriene. Kurvenes toppunkt viser bruddspenningen, mens nivået der kurvene flater ut etter brudd tilsvarer residualspenningen. For serie 1 (enaksielt) varierer bruddspenningen fra 35,5-64,8 MPa, med et gjennomsnitt på 55,6 MPa. E-modulus varierer fra 8,9-24,3 og Poissons forhold mellom 0,35-0,41. For serie 2

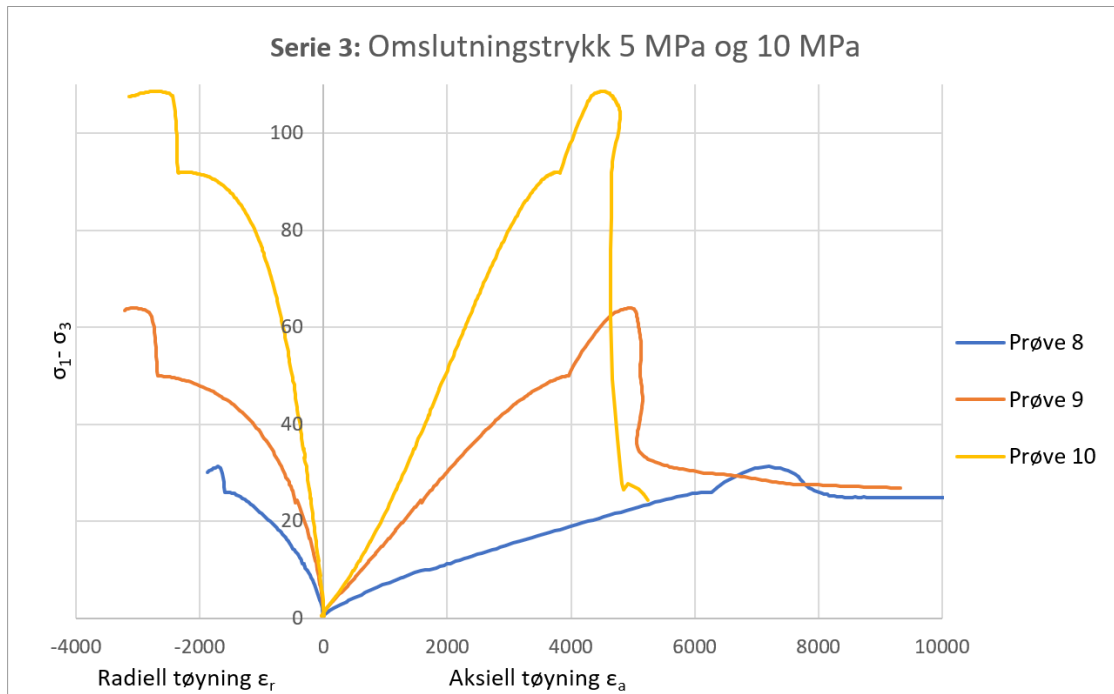
og serie 3 vises store variasjoner innenfor hver serie. Valget om å kjøre flere laststeg ble tatt etter den første treaksialtesten på kjerne nr. 2. Derfor har denne bare én verdi for σ_1 .



Figur 9.11: Spenning-tøyningskurve for serie 1, uten omslutningstrykk.



Figur 9.12: Spenning-tøyningskurve for serie 2, med et omslutningstrykk på 2,5 og 5 MPa. Prøve 2 ble bare påført ett omslutningstrykk, $\sigma_3=2,5$ MPa.



Figur 9.13: Spenning-tøyingskurve for serie 3, med et omslutningstrykk på 5 og 10 MPa.

XRD

Før XRD analyse ble kjernene delt i tre grupper etter styrken på materialet (relativt til hverandre). Derfor er én XRD utført på materiale fra prøve 1,2 og 10 (sterkest) og én XRD utført på prøve 3,4,6,7 og 9 (middels). Prøve 8 skilte seg ut som desidert svakest og er derfor testet alene. Svelltest utført på prøve 8 viste ingen svellende mineraler. Frisvellingstest ble også gjennomført for å verifisere dette. Denne viste ingen svelling. Diffraktogrammene fra analysen finnes i vedlegg D.3. XRD analysen viser en stor andel albitt, kvarts og glimmer. Glimmerinnholdet ligger rundt 20 %.

Tabell 9.6: Resultat fra XRD analysen fra KH-01-17 viser prosentvis andel av hvert mineral.

Mineraler	Prøve nr. 1, 2, 10 [%]	Prøve nr. 3, 4, 6, 7, 9 [%]	Prøve nr. 8 [%]
Albitt	42	47	39
Kvarts	22	12	14
Glimmer	21	20	20
Mikroclin	5	5	5
Diopsid	4	5	6
Hornblende	4	8	12
Klinozoisitt	2	2	4
Kloritt	0	3	0

9.3.2 Resultater for KH-02-17

Under vises resultatene fra laboratorietestene utført på kjernene fra borehull KH-02-17. Det er utført tester på 5 kjerner, se figur 9.14. Prøve nr. 4 og 6.2 er forkastet på grunn av forvitring og avskalling.

Lydhastighet og tetthet

Lydhastighet og tetthet samt gjennomsnittlige verdier for kjernene fra KH-02-17 i tørr og vannmettet tilstand vises i tabell 9.7. For alle registrerte verdier henvises det til vedlegg D.4.

Resultatene viser at lydhastigheten varierer mellom 4393 - 5041 m/s for de tørre prøvene, med et gjennomsnitt på 4812 m/s. For vannmettede prøver er variasjonen mellom 5138 - 5442 m/s, med et gjennomsnitt på 5379 m/s. Den gjennomsnittlige tettheten er 2,80 g/cm³ for både tørre og vannmettede prøver.

Tabell 9.7: Gjennomsnittlig lydhastighet og tetthet for KH-02-17.

Prøve KH-01-17	Tørr		Vannmettet	
	Lydhastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]	Lydhastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]
2.1	5018	2,83	5442	2,83
2.2	5041	2,80	5441	2,81
3	4896	2,81	5440	2,81
5	4393	2,77	5138	2,78
6.1	4710	2,78	5432	2,78
Gjennomsnitt	4812	2,80	5379	2,80

Tilttest

Basis friksjonsvinkel for kjernene fra KH-02-17 er vist i tabell 9.8. Denne er beregnet etter ligning (9.3), som medianen av totalt 30 utførte tilttester. Alle de registrerte målingene kan finnes i vedlegg D.5. Basis friksjonsvinkel er beregnet til å være 30,9 °.

Tabell 9.8: Resultat tilttest KH-02-17

Lokasjon	Basis friksjonsvinkel, ϕ_b
KH-02-17	30,9 °

Enaksiell trykktest

Fem kjerner ble enaksielt testet. Figur 9.14 viser kjernene etter brudd. Resultatet fra testene vises i tabell 9.9, med enaksiell trykkfasthet (σ_{ci}), E-modulus (E) og Poissons forholdstall (ν). Bruddvinkel er ikke registrert da bruddene var for komplekse til at vinkelen kunne måles. Spenning-tøyningskurvene til prøvene er vist i figur 9.15.

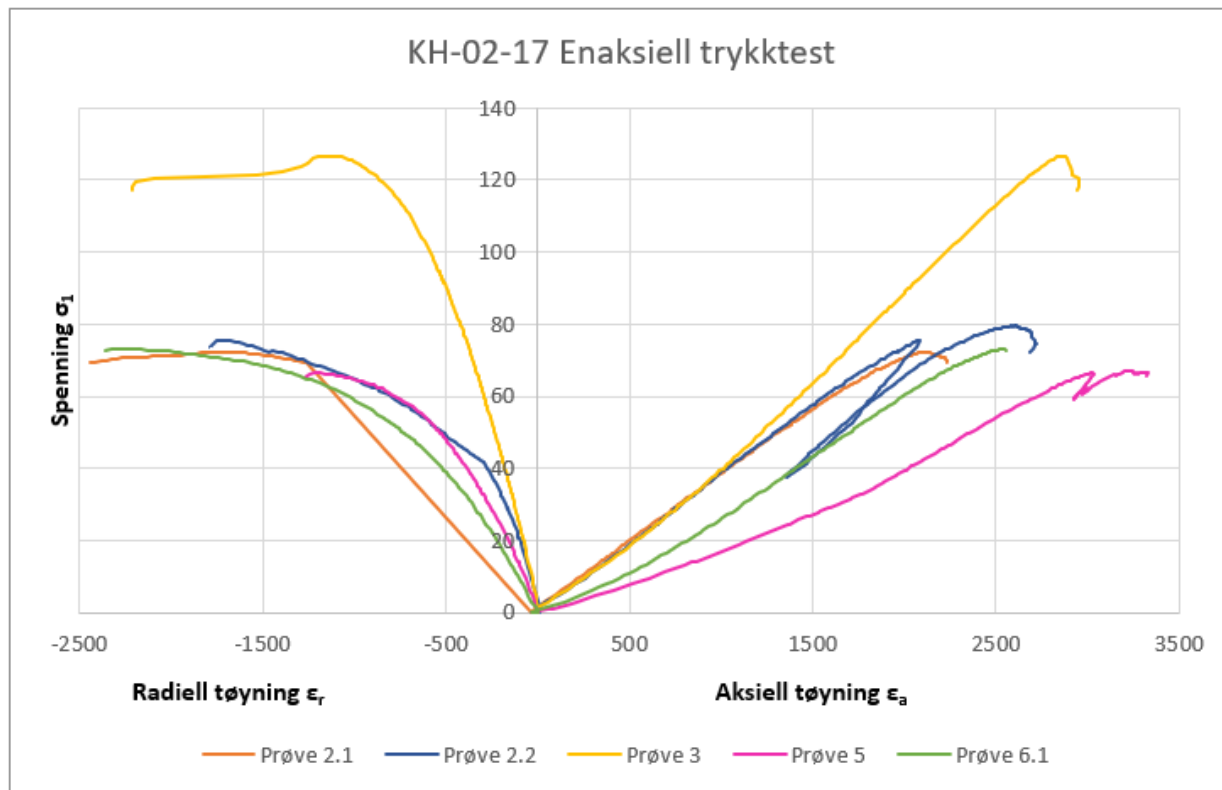


Figur 9.14: Resultatet fra enaksiell trykktest utført på KH-02-17.

Tabell 9.9: Resultat fra enaksiell testing. (*) Ugyldig resultat.

Prøve nr.	σ_{ci} [MPa] (lign. (3.1))	E-modul [GPa] (lign. (3.2))	Poisson forholdstall (lign. (3.3))
2.1	72,2	38,24	0,55
2.2	79,5	40,84	0,42
3	126,6	49,05	0,3
5	67,1	29,2	0,41
6.1	73	34,91	0,61 (*)

σ_{ci} varierer mellom 72,2-126,6 MPa, med et gjennomsnitt på 83,7 MPa. E-modul varierer mellom 29,2-49,05 GPa, og har et snitt på 38,4 GPa. Poissons forhold varierer mellom 0,3-0,55, med et gjennomsnitt på 0,42. Verdien på 0,61 er for høy og regnes dermed som ugyldig.



Figur 9.15: Resultatet fra enaksiell trykktest utført på KH-02-17.

XRD

Tabell 9.10 viser resultatene XRD analysen. Det ble utført én XRD med prøvemateriale fra alle de fem kjernene. Diffraktogrammene fra analysen kan finnes i vedlegg D.3.

Resultatene viser størst andel albitt (55%), glimmer (15%) og kvarts (10%).

Tabell 9.10: Resultat fra XRD analysen av kjernene fra KH-02-17.

Mineraler	KH-02-17 Alle kjerner	
	[%]	
Albitt	55	
Kvarts	10	
Glimmer	15	
Mikroclin	4	
Diopsid	5	
Hornblende	9	
Klinozoisitt	1	
Kloritt	2	

9.4 Oppsummerende betraktninger

I dette delkapittelet vil resultatene bli diskutert og satt i sammenheng med verdier for gneis og tidligere laboratorieundersøkelser fra Åkneset. Under presenteres verdier for gneis som senere sammenlignes med verdier fra laborietesting av kjernene fra KH-01-17 og KH-02-17. Det blir lagt størst vekt på treksialforsøket utført på kjernene fra KH-01-17. Videre analyse for bestemmelse av Hoek-Brown- og Mohr-Coulombparametere kommer i kapittel 10.

9.4.1 Sammenligningsverdier

Tabell 9.11 viser verdier fra tidligere laborieforsøk på gneis, både fra Åkneset og andre steder. Ved sammenligning er det viktig å huske at gneisen som er testet i denne forbindelse både er vannmettet og befinner seg nær skjærsoner. Dette gjør at resultatene naturlig blir svakere. Resultatene fra laborietesting finnes i kapittel 9.3.

Tabell 9.11: Gjennomsnittlige verdier av tidligere laborieresultater for sammenligning.

Parameter	Verdi	Beskrivelse	Kilde
Tyngdetetthet (γ)	27,18 kN/m ³ 26,86 kN/m ³	Fra KH-01-12 Åkneset Åkneset	(Langeland, 2014) (Kveldsvik <i>et al.</i> , 2008).
Enaksiell trykkfasthet (σ_{ci})	155.04 MPa 146 MPa 69-226 MPa 130 MPa	Fra KH-01-12 Åkneset Åkneset r Grubben gneiser 107 prøver av gneis (NTNU/SINTEF)	(Langeland, 2014) (Kveldsvik <i>et al.</i> , 2008) (Myrvang, 2001) (Nilsen og Palmstrøm, 2000)
E-modul (E)	39,89 GPa 40 GPa 15-75 GPa 50 GPa	Fra KH-01-12 Åkneset Åkneset Bergartsgruppen Gneis (NTNU/SINTEF) 107 tester på gneis (NTNU/Sintef)	(Langeland, 2014) (Kveldsvik <i>et al.</i> , 2008) (Myrvang, 2001) (Nilsen og Palmstrøm, 2000)
Poisson (ν)	0,11 0,13 0,17	Fra KH-01-12 Åkneset Åkneset Tafjord (nærheten av Åkneset)	(Langeland, 2014) (Kveldsvik <i>et al.</i> , 2008) (Myrvang, 2001)
Basis friksjonsvinkel (ϕ_b)	29,65 ° 27,6 ° 28 °	Fra KH-01-12 Åkneset 216 tester på Greis Åkneset Åkneset	(Langeland, 2014) (Kveldsvik <i>et al.</i> , 2008) (Grøneng <i>et al.</i> , 2009b)
Kohesjon (c)	19 MPa 25 MPa	Diorittisk gneis Åkneset Granittisk gneis Åkneset	(Grøneng <i>et al.</i> , 2009b) (Grøneng <i>et al.</i> , 2009b)
Friksjonsvinkel ϕ	57 ° 59 °	Diorittisk gneis Åkneset Granittisk gneis Åkneset	(Grøneng <i>et al.</i> , 2009b) (Grøneng <i>et al.</i> , 2009b)

9.4.2 Diskusjon av resultater fra kjernene fra KH-01-17

Basis friksjonsvinkel, ϕ_b

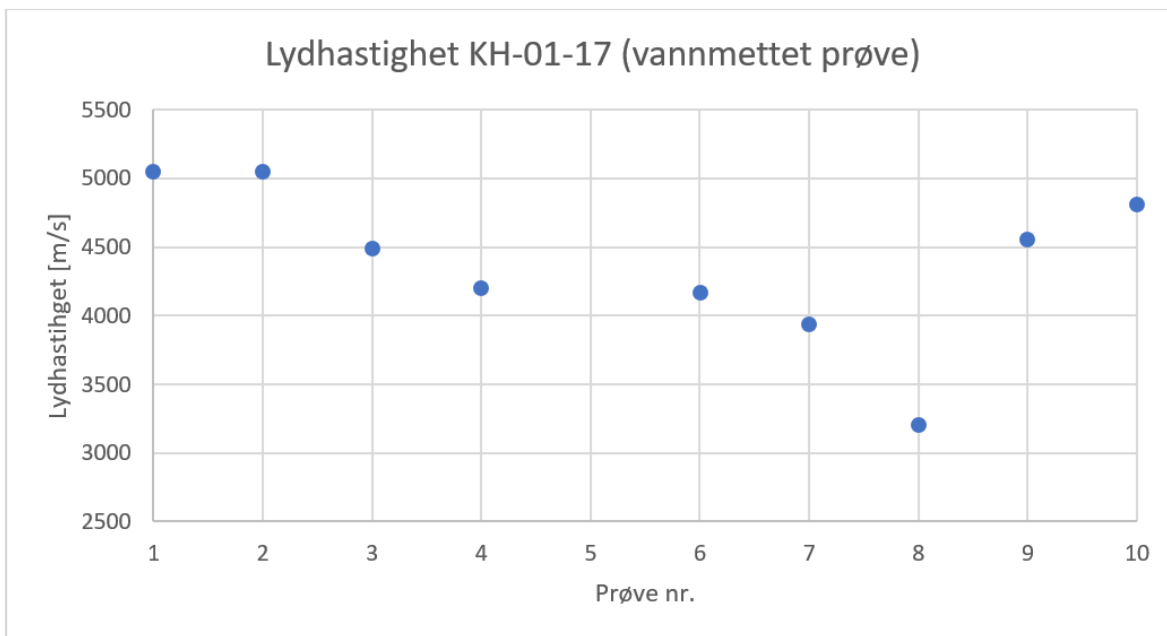
Tilttesten ble utført på tørre kjerner og viste at bergarten hadde en gjennomsnittlig basis friksjonsvinkel $\phi_b = 31.9^\circ$. Ved sammenligning med tidligere undersøkelser, tabell 9.11, ligger denne verdien noe høyere. Kveldsvik *et al.* (2008) og Grøneng *et al.* (2009b) gir gjennomsnittlig

$\phi_b = 27,5^\circ$ og $\phi_b = 28^\circ$. Forsøk utført av Langeland (2014) viser gjennomsnittlig $\phi_b = 29,65^\circ$. At resultatene viser høyere friksjonsvinkel kan ha sammenheng med metoden, selv om dette egentlig tas hensyn til ved å benytte omregningsfaktoren gitt i standarden, se ligning (9.3). Metoden benytter tre hele kjerner, mens det tidligere har vært vanlig å dele hver kerne i to langs lengdeaksen. Metoden gjør det mulig å benytte kjernene videre til trykkforsøk.

Tetthet og lydshastighet

Tettheten ble målt til å være 28,1 og 28,2 kN/m³ for henholdsvis tørre og vannmettede prøver, tabell 9.3. Denne tettheten er høyere enn den funnet av Langeland (2014) og Kveldsvik *et al.* (2008), tabell 9.11.

Figur 9.16 viser lydshastigheten til hver enkelt prøve i våt tilstand for å illustrere variasjonen i dataene. Lydshastigheten varierer fra 3204 m/s (prøve 8) til 5048 m/s (prøve 2). Dette spriket på nesten 2000 m/s forekommer innenfor et område på 6 meter i borehullet.



Figur 9.16: Lydshastigheten til hver enkelt prøve i KH-01-17. Resultatene viser en variasjon fra 3204 m/s til 5048 m/s.

Valg av serier

På bakgrunn av variasjonen vist i figur 9.16 ble det bestemt hvilke kjerner som skulle testes sammen under treaksialtesten. Siden treaksialtesten skal representere den samme bergarten ble det valgt å teste én sterk, én middels og én svak kerne i samme serie. Ingen av disse prøvene viser seg å ha bergmekaniske egenskaper som tilsier at de er sterke, så når de heretter blir omtalt som sterk, middels og svak er dette relativt til hverandre. Prøve nr. 1, 2 og 10 ble definert som sterke kjerner, prøve nr. 3, 4 og 9 som middels og prøve 6, 7 og 8 som svake. En prøve fra hver «styrkegruppe» ble testet under de samme spenningsforholdene (samme

omslutningstrykk), som vist i tabell 9.5. Dette ble gjort for at seriene skulle bli mest mulig like og representere bergmassen på best mulig måte.

E-modul, Poissons forhold og enaksiell trykkfasthet

Ut fra serie 1, som ble testet enaksielt, ble E-modul, Poissons forhold og enaksiell trykkfasthet funnet, tabell 9.5. I følge Myrvang (2001) kan E-modulen for gneis ligge mellom 15-75 GPa. Langeland (2014) og Kveldsvik *et al.* (2008) angir E-moduler på henholdsvis 39,9 og 40 GPa på kjerner testet fra Åkneset. Laboratorietesting fra dette forsøket gir lavere verdier for E-modul, mellom 8,9-24,3 GPa. I følge Myrvang (2001) blir E-modulen til gneiser lite påvirket av foliasjonen, men spredning i en serie kan skyldes inhomogeniteter i kjernene. Slike inhomogeniteter kan komme av riss i kjernene som følge av nærheten til glideplanet. Dette vil påvirke bergmassen nærmest glideplanet og avta utover i bergmassen. At bergarten inneholder glimmer kan også bidra til å redusere E-modulen, tabell 9.6 (Myrvang, 2001).

I følge Myrvang (2001) skal Poissons forhold variere mellom 0,04- 0,35. Dette stemmer godt overens med tidligere målinger fra Åkneset, tabell 9.11. Poissons fra dette laborieforsøket viser noe høyere verdier, mellom 0,28 - 0,41, tabell 9.5.

Den enaksiale trykkfastheten (serie 1) viser verdier mellom 35,5-64,8 MPa, med et gjennomsnitt på 54,9 MPa. I følge ISRM (1978a) er dette en bergart med høy styrke, tabell 9.12. Sammenlignes den derimot med andre skandinaviske gneiser og tidligere undersøkelser fra Åkneset i tabell 9.11, som viser målinger over 130 MPa, er trykkfastheten lav i dette forsøket.

Tabell 9.12: Klassifisering av bergartsstyrke basert på enaksiell trykkfasthet (ISRM, 1978a)

Betegneslse	Enakset trykkfasthet σ_{ci} (MPa)
Ekstremt lav styrke	0,25-1
Meget lav styrke	1-5
Lav styrke	2-25
Medium styrke	25-50
Høy styrke	50-100
Meget høy styrke	100-250
Ekstremt høy styrke	>250

XRD

Det ble utført tre XRD analyser. Disse viste en forholdsvis lik mineralsammensetning, tabell 9.6. Sammenlignet med XRD utført av (Langeland, 2014) viser resultatet en noe høyere andel albitt og mindre kloritt.

Målet med XRD analysen var å se på glimmerinnholdet. Dette ligger på omtrent 20%. Det var forventet at bergarten skulle inneholde en enda større andel glimmer nær skjærsonene og at dette var en av årsakene til det svake berget. Prøvene viser ikke innhold av svelleleire, hverken ved XRD eller frisvellingstest.

9.4.3 Diskusjon av resultater fra KH-02-17

Det var få kjerner fra det aktuelle området i borehull KH-02-17 som innfridde standardens lengde/diameterkrav. Få kjerneprøver reduserer troverdigheten til resultatene og representerer ikke bergarten godt i en treaksialtest som krever flere serier. Ved for få serier og for få prøver innenfor hver serie vil dette gjøre målingene usikre, i og med at det kan være tilfeldigheter og svakheter i enkelte prøver som da vil gi et annet resultat enn det som egentlig representerer bergarten som helhet. For å kunne gi gode resultater på det tilgjengelige materiale, ble det besluttet å gjennomføre enaksialtest i stedet for treaksialtest.

I tillegg til enaksialtest er også tilttest, lyd hastighet, tetthet og XRD utført på materiale fra KH-02-17. Siden dette blir basert på det samme sammenligningsgrunnlaget som KH-01-17 er det lagt størst vekt på den enaksiale trykkfasthetstesten og parameterene σ_{ci} , E og ν i denne diskusjonen.

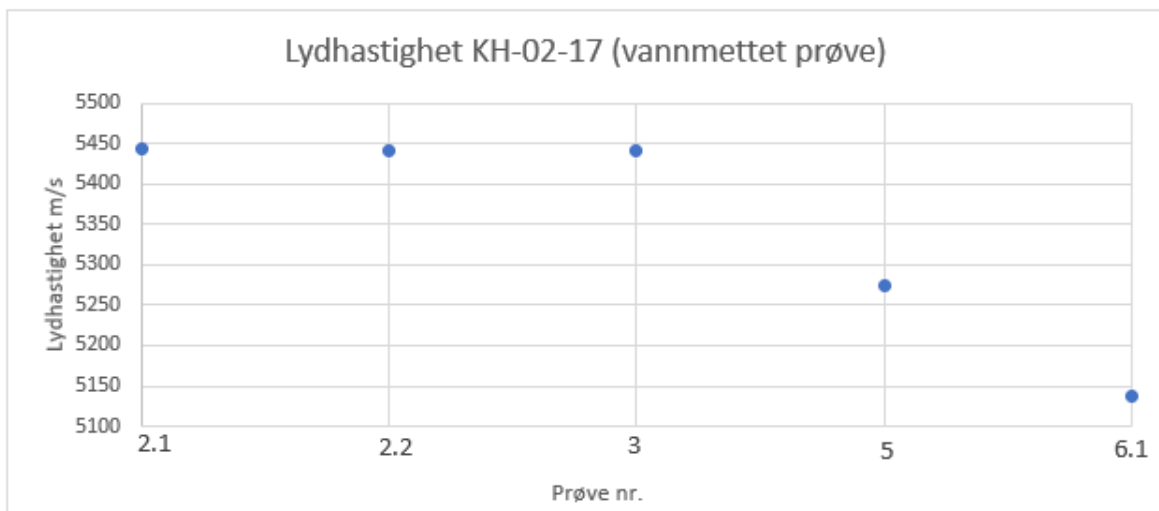
Basis friksjonsvinkel, ϕ_b

Tilttesten viste en basis friksjonsvinkel på $30,9^\circ$. Som vist i figur 9.11 er dette noe høyere enn andre verdier fra Åkneset.

Tyngdetetthet og lyd hastighet

Den gjennomsnittlige tyngdetettheten til kjernen fra KH-02-17 er $28,0 \text{ kN/m}^3$ for både vannmettede og tørre kjerner. Til sammenligning har Kveldsvik *et al.* (2008) beregnet en tyngdetetthet på $27,18 \text{ kN/m}^3$ og Langeland (2014) $26,86 \text{ kN/m}^3$.

Figur 9.17 viser lyd hastigheten til prøvene fra KH-02-17. Disse har en variasjon mellom 5138 - 5442 m/s. I motsetning til lyd hastighet hos KH-01-17 som varierte med over 2000 m/s, varierer lyd hastigheten i KH-02-17 bare med omtrent 300 m/s og gir uttrykk for å være mer homogene prøver.



Figur 9.17: Lyd hastigheten til hver enkelt prøve i KH-02-17. Resultatene viser en variasjon fra 5138 m/s til 5442 m/s.

Enaksiell trykkfasthet, E-modul og Poissons forhold

Det er utført enaksiell trykkfasthetstest (σ_c) på fem kjerneprøver. Resultatet fra disse er vist i figur 9.6 og tabell 9.9. σ_c lå mellom 67,1 - 79,5 MPa, bortsett fra for prøve nr. 3 som skilte seg ut med $\sigma_c = 126,6$ MPa. Den gjennomsnittlige trykkfastheten er 84 MPa. Ved bruk av median, som benyttes for å utelukke uteliggere, blir trykkfastheten 73 MPa. Bergarten er ifølge tabell 9.12 definert som en bergart med høy styrke og er sterkere enn kjernene testet fra borehull KH-01-17. Likevel er styrken lavere enn det tidligere undersøkelser viser, tabell 9.11.

E-modulen ligger mellom 29,2 - 49,05 GPa, med et snitt på 36,3 GPa. Dette stemmer godt overens med Langeland (2014) og Kveldevik *et al.* (2008) som gir gjennomsnittlige E-moduler på henholdsvis 39,89 og 40 GPa.

Poissons forhold ligger mellom 0,30- 0,55, med et snitt på 0,42. Verdien for kjerne 6.1 har et forholdstall på 0,61. Dette er for høyt og resultatet regnes dermed som ugyldig. Som tidligere nevnt ligger Poissons forholdstall normalt mellom 0,04-0,35 (Myrvang, 2001), noe som vil si at laboratorieresultatene viser unormalt høye verdier. Dette kan komme av inhomogeniteter i kjernene.

Disse kjernene gikk i komplekse brudd, med både avskallinger, skjærbrudd og splitting, se figur 9.14. Derfor ble bruddvinkelen ikke målt.

XRD

Siden kjernene fra KH-02-17 framsto som forholdsvis like ble det valgt å knuse alle kjernene sammen og utføre én XRD analyse. Resultatet fra XRD analysen viser et stort innhold av albitt (55%), glimmer (15%), kvarts (10%) og hornblende (9%), se tabell 9.10. Også her var glimmerinnholdet lavere enn antatt.

Analyse av laboratorieresultater

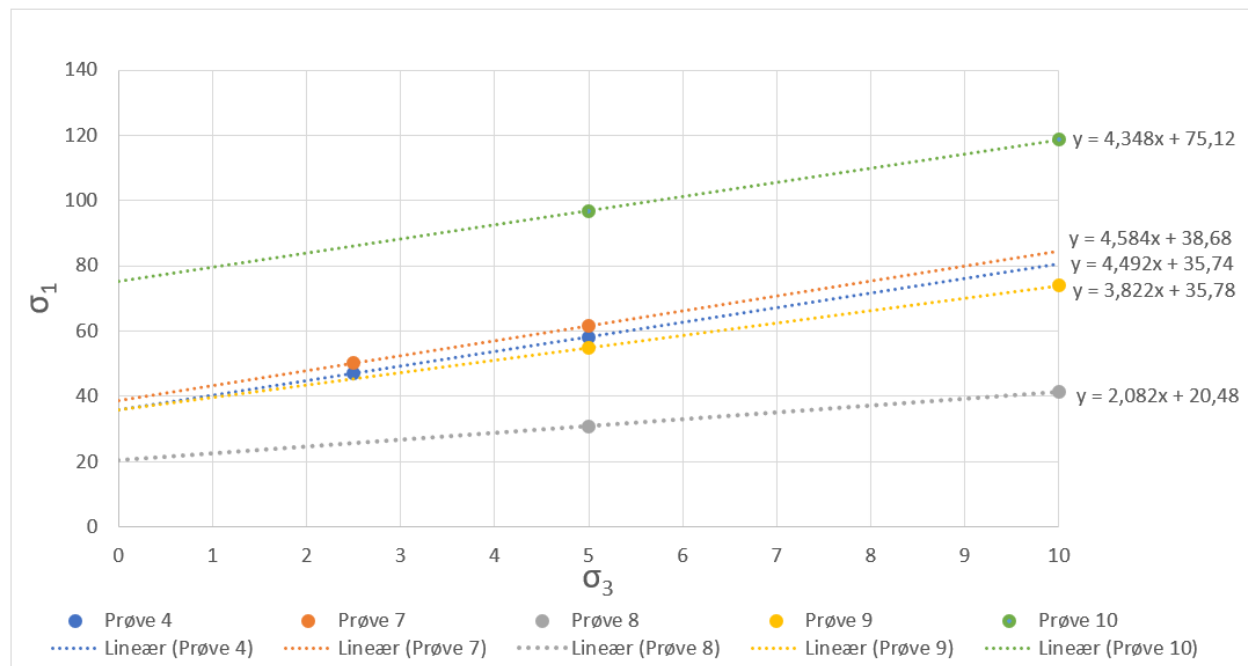
I denne delen vil det blir lagt vekt på analyse av laboratorieresultatene fra treaksialtestingen utført på kjerner fra borehull KH-01-17.

10.1 Beregning av friksjonsvinkel og kohesjon fra laboratorieresultatene

Underveis i treaksforsøket ble det oppdaget at berget ikke var så sprøtt som antatt, og at det var mulig å påføre flere laststeg for å få flere resultater. For de kjernene der det ble benyttet to laststeg, får vi to verdier for bruddspenningen når σ_1 plottes mot σ_3 , se figur 10.1. Dette gjør det mulig å beregne korrekte verdier for friksjonsvinkelen (ϕ) og kohesjon (c) ved laboratorieforsøket. Disse parameterne beregnes ut fra ligning (3.8) og (3.7). Her benyttes parameteren k som er stigningstallet til grafen mellom de to punktene plottet i σ_1 - σ_3 -diagrammet i figur 10.1. Det forutsettes en rettlinjet sammenheng mellom de to punktene. De beregnede friksjonsvinklene og kohesjon finnes i tabell 10.1.

Friksjonsvinkelen kan variere fra 0 til nesten 60°, og tilsvarende bruddvinkler mellom 15-45° (Myrvang, 2001). Friksjonsvinkelen reflekterer styrken på bergarten, dvs. at en lav friksjonsvinkel gir en lav styrke (Myrvang, 2001). En høy friksjonsvinkel får man hvis det å påføre høyere omslutningstrykk øker bruddspenningen betraktelig. Lav friksjonsvinkel forekommer hvis økningen i omslutningstrykk bare gir en liten økning i bruddspenning.

Prøve 8 skiller seg ut med en friksjonsvinkel på 20°, mens de fire andre kjernene har friksjonsvinkler mellom 35,8° - 39,9°. Kohesjonene er størst for prøve 10 som har kohesjon på 18 MPa, mens de fire andre kjernen viser kohesjon mellom 7,1 - 9,2 MPa. Til sammenligning målte Grøneng *et al.* (2009b) $\phi=57^\circ$ og $c=19$ MPa på diorittisk gneis og $\phi=59^\circ$ og $c=25$ på granittisk gneis fra Åkneset, tabell 9.11.



Figur 10.1: Friksjonsvinkelen kan finnes nøyaktig når man har to målinger på samme kjerne. Ved utregning av friksjonsvinkelen benyttes k som er stigningstallet til kurven.

Tabell 10.1: Friksjonsvinkel og kohesjon

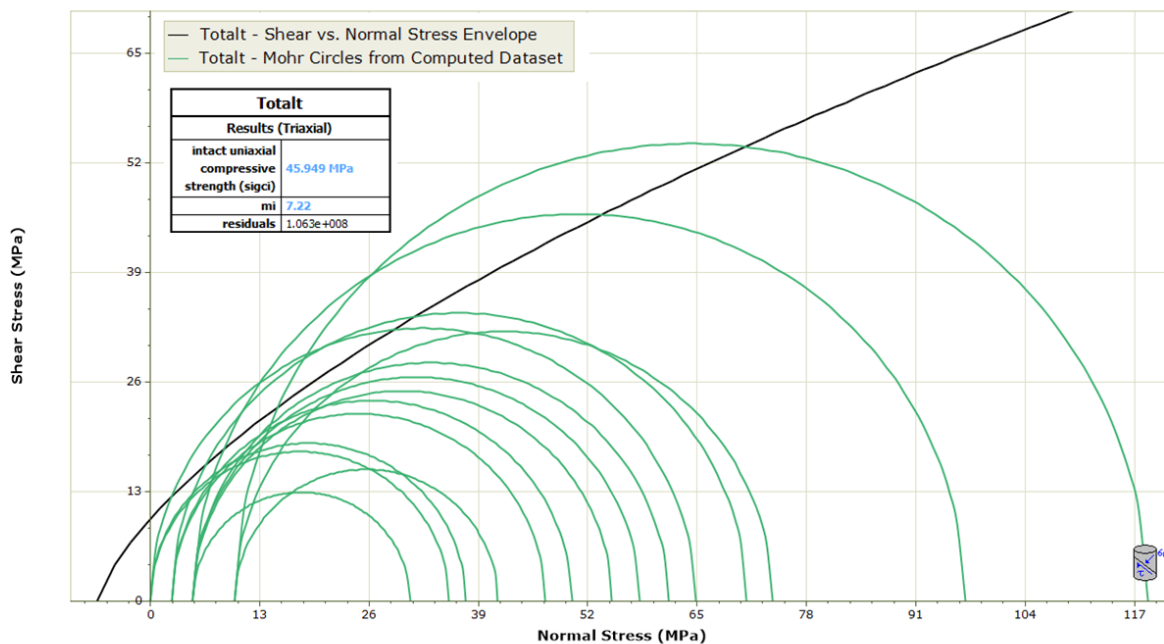
Prøve nr.	k (fig.10.1)	ϕ [°] lign.((3.8))	c [MPa] (lign.(3.7))
4	4,492	39,5	8,4
7	4,584	39,9	9,0
8	2,082	20,6	7,1
9	3,822	35,8	9,2
10	4,348	38,8	18,0

10.2 Analyse av laboratorieresultatene i RocData

Analyse av dataene fra treaksialtestingene ble gjennomført ved bruk av RocData. Dette gjør det mulig å finne Hoek-Brown og Mohr-Coulomb parameterne.

10.2.1 Mohr-sirkler og lineærregresjon

Figur 10.2 viser Mohr-sirklene for hele datasettet, der σ_1 og σ_3 er plottet mot skjærspenning, τ . Som tidligere nevnt er det variasjon i dataene. Da disse dataene baserer seg på spredte målinger vil de ikke nødvendigvis være representative for hele den mørke og finkornete gneisen. Dette ser man ved lineærregresjonen, den svarte kurven som representerer bruddkurven. Ved et «optimalt» prøveresultat hadde bruddkurven omhyllet hver av halvsirklene. I dette tilfellet får man en dårlig tilpasning da variasjonen i dataene er stor. Likevel gir den enaksiell trykkfasthet for intakt berg $\sigma_{ci}=45.9$ og Hoek-Brown konstanten for intakt berg $m_i=7,22$.



Figur 10.2: Viser bruddkurven for det totale datasettet.

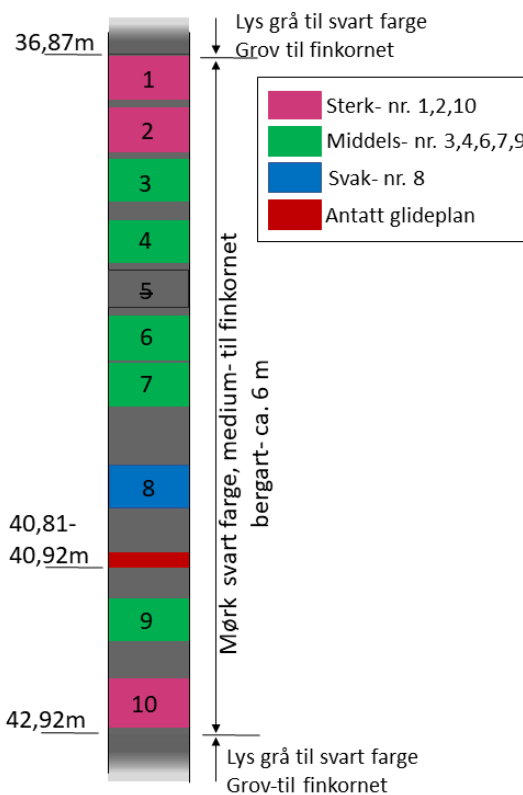
Som nevnt ovenfor og vist tidligere i kapittel 9.4.2 er det variasjoner i målingene. Etter diskusjon med Gunnar Vistnes på laboratoriet ble det forsøkt å dele målingene inn i tre kategorier, slik at man for hver av disse får en bedre tilpasning og mer nøyaktige parametere.

Målingene ble delt i tre kategorier som viser tilsynelatende mer like egenskaper. Figur 10.4-10.2 viser Mohr-sirklene for disse gruppene, og man ser at bruddkurven har en bedre

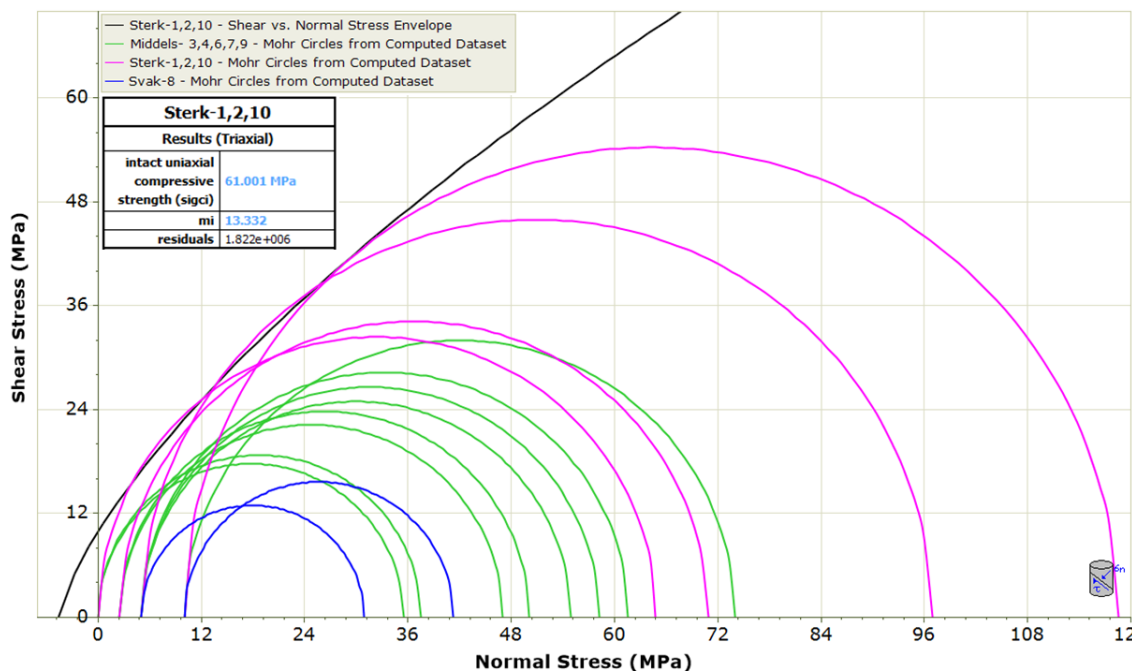
tilpasning til dataene. Når disse kategoriene blir tegnet inn i borehullet, se figur 10.3, ser man at styrken har sammenheng med nærheten til glideplanet og viser at en slik fordeling i kategorier kan være naturlig.

Når gruppene her er definert som sterk, middels og svak er dette kun relativt til hverandre. De blå buene representerer de sterkeste prøvene (nr. 1, 2 og 10), grønne representerer middels sterke prøver (nr. 3, 4, 6, 7 og 9) mens blå skiller seg ut som svakeste kjerne (nr. 8).

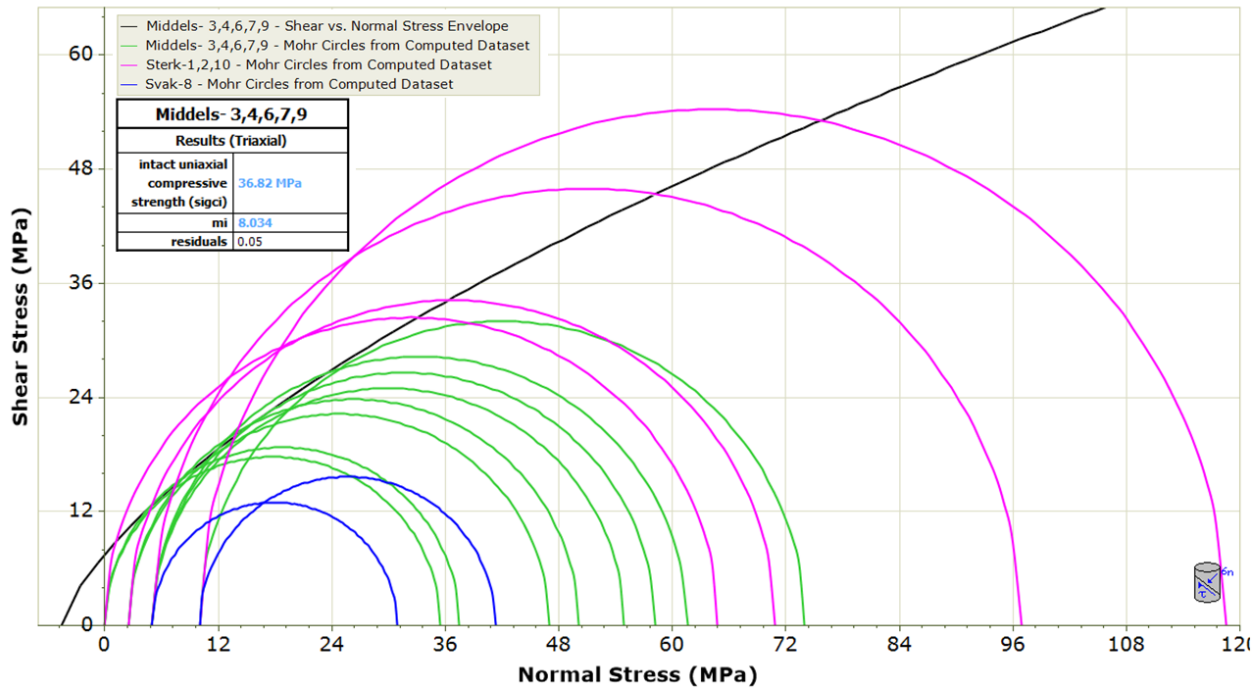
Figur 10.4 representerer de kjernene som har fått det sterkeste resultatet. Disse er plassert i den rosa kategorien og har en $\sigma_{ci} = 61.0$ og $m_i = 13.3$. Figur 10.5 viser lineærregresjonen for kjernene med middels styrke. Disse er representert av den grønne kategorien og har en $\sigma_{ci} = 36.8$ og $m_i = 8.0$. Figur 10.6 viser resultatet for kjerneprøve nr. 8 som er den svakeste prøven. Bruddkurven omhyller de blå halvsirklene og verdien for $\sigma_{ci} = 19,0$ og $m_i = 3,24$. Alle tre kategoriene får bruddkurver som omhyller deres Mohr-sirkler.



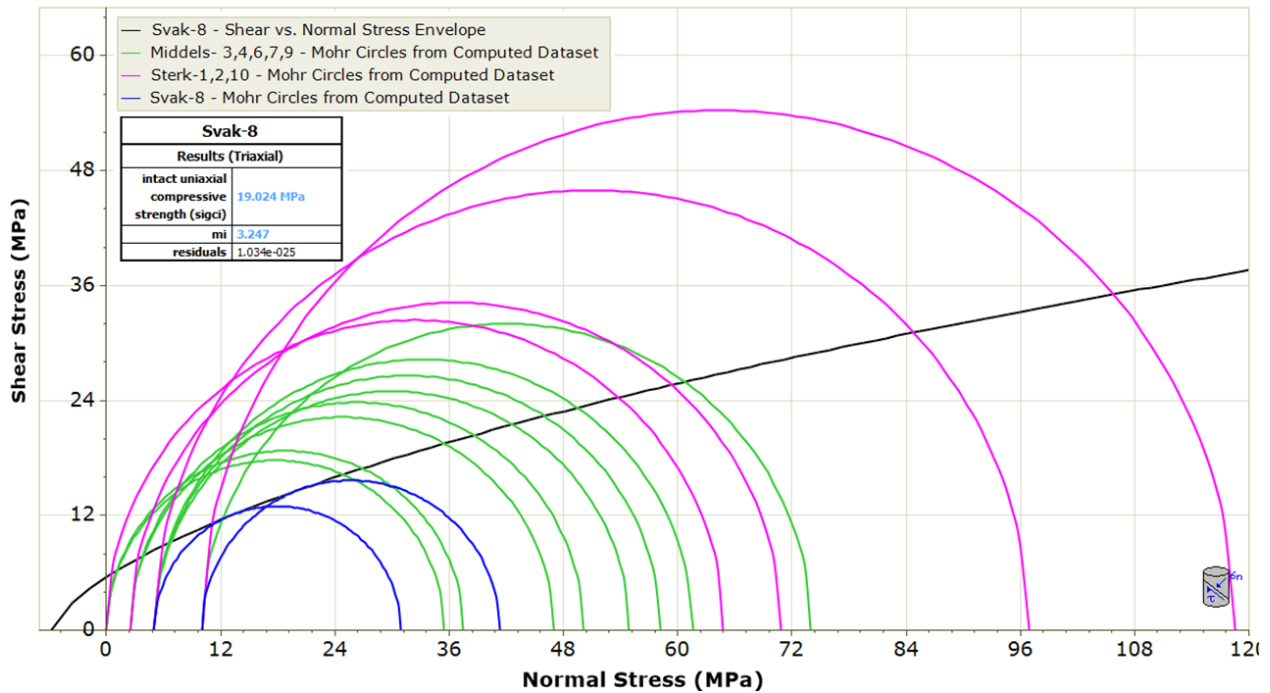
Figur 10.3: Indikerer kjerneprøvenes plassering i borehullet i forhold til glideplanet.



Figur 10.4: Viser bruddkurven for kjerne 1,2 og 10 (rosa halvsirkler).



Figur 10.5: Viser bruddkurven for kjerne 3,4,6,7 og 9 (grønne halvsirkler).



Figur 10.6: Viser bruddkurven for kjerne 8 (blå halvsirkler).

For de tre kategoriene og det totale datasettet varier m_i mellom 3,24 - 13,3. Verdiene for m_i og σ_{ci} er samlet i tabell 10.2. Dette er lave verdier for m_i . Til sammenligning angir Nilsen og Palmstrøm (2000) $m_i = 29,2$ for gneis og $m_i = 30$ for granittisk gneis.

Tabell 10.2: Beregnet σ_{ci} og m_i ut fra resultatet fra treaksialtestingen og Mohr sirklene.

Kategori	Sterk	Middels	Svak	Total
σ_{ci}	61.0	36.8	19.0	45.9
m_i	13.3	8.0	3.24	7.2

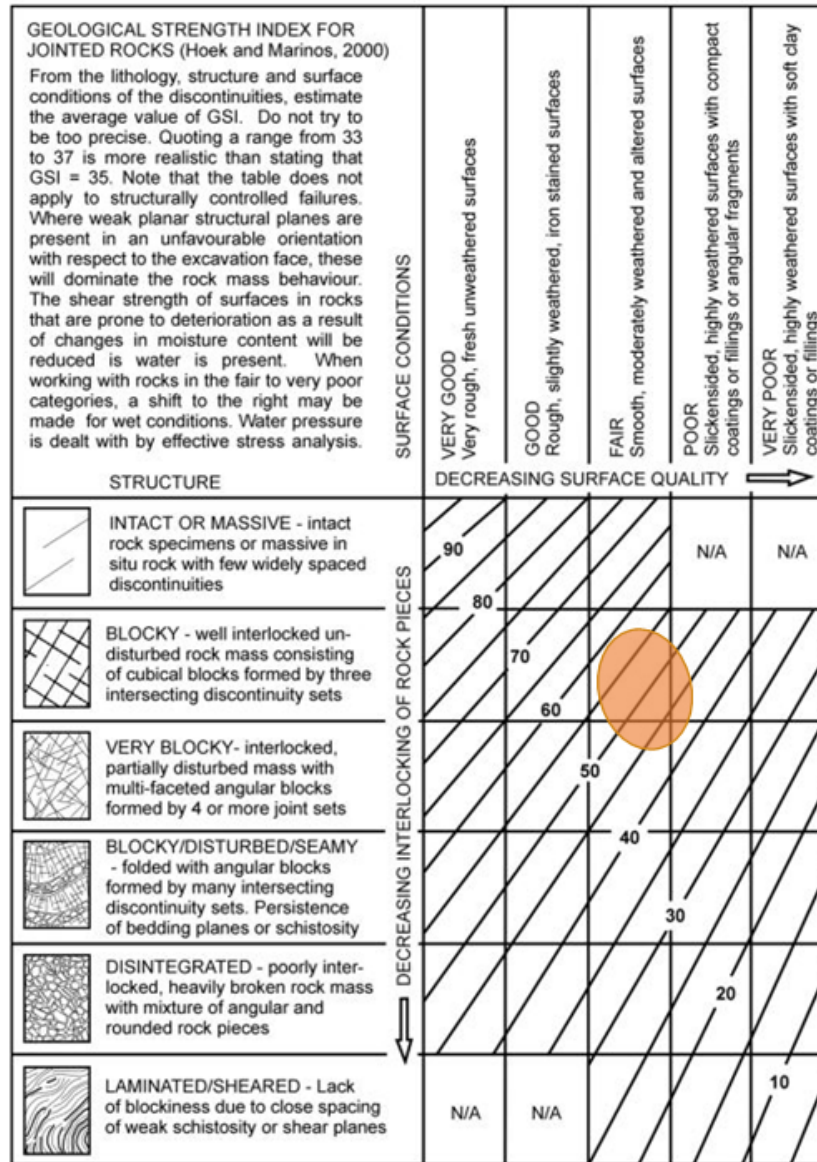
10.2.2 Valg av parametere

To av verdiene som kreves for å bruke Hoek-Brown kriteriet er σ_{ci} og m_i ble funnet i delkapittelet ovenfor, se tabell 10.2. Den tredje verdien som må bestemmes er GSI, som estimeres ut fra figur 10.7. Vurderingen er gjort ut fra observasjoner av kjernene. Berget er vurdert som en «blocky structure» med en overflatekvalitet definert som «fair». Dette gir en GSI verdi rundt 50 ± 5 . Det er vanskelig å gi GSI som et eksakt tall, derfor er det valgt å gi en GSI verdi innenfor et område markert med sirkel i figur 10.7.

Tabell 10.3 viser hvilke inputparametere som ble benyttet i RocData og resultatparameterne for hver av de tre kategoriene og totalt for hele datasettet. E-modulus for intakt berg (E_i) ble valgt som gjennomsnittlig E-modul av de tre enaksiale testene i KH-01-17, se tabell 9.5. Dette ga $E_i = 14.72$ GPa. Disturbance factor (D) er satt til 0, siden det ikke er gjort noe sprengningsarbeid eller annet som påvirker fjellsiden.

Tabell 10.3: Inputparametre og resultater etter analyse i RocData for de tre kategoriene sterk, middels og svak, og det totale datasettet.

	Prøve	Sterk	Middels	Svak	Totalt	Kilde
Hoek-Brown klassifisering- inputdata						
Enaksiell trykkstyrke, intakt berg	σ_{ci} [MPa]	61	37,34	19,02	45.9	RocData
Geological strengt index	GSI	50	50	50	50	Figur 10.7
Hoek-Brown konstanten, intakt berg	m_i	13,3	7,48	3,25	7.2	RocData
Disturbance factor	D	0	0	0	0	Uberørt skråning
E-modul	E_i [MPa]	14720	14720	14720	14720	Snitt tabell 9.5
Hoek-Brown-kriteriet						
Hoek-Brown konstanten, bergmassen	m_b	4,556	2,562	1,113	1,207	RocData
Materialkonstant	s	0,036	0,036	0,036	0,004	RocData
Materialkonstant	a	0,501	0,501	0,501	0,506	RocData
Mohr-Coulomb tilpasning						
Kohesjon	c [MPa]	1,471	2,655	3,314	2,393	RocData
Friksjonsvinkel	ϕ [°]	17,14	27,38	32,95	25,95	RocData
Bergmasseparametre						
Strekkspenning	σ_i [MPa]	-0,478	-0,520	-0,610	-0,147	RocData
Enaksiell trykkstyrke	σ_c [MPa]	11,470	7,021	3,576	2,764	RocData
Global styrke	σ_{cm} [MPa]	19,169	9,447	3,794	6,86	RocData
Deformasjonsmodulus	E_{rm} [MPa]	20621,389	7904,113	2843,319	4521,776	RocData



Figur 10.7: Valgt GSI verdi for den aktuelle strukturen i KH-01-17.

10.3 Oppsummerende bemerkninger

Bestemmelse av GSI er vanskelig ut fra en endimensjonal borekjerne. Oppsprekningen langs foliasjonen er tydelig da denne ligger vinkelrett på kjernen. Andre sprekkesett som ligger mer parallelt med borekjernene er det derimot vanskelig å si noe om, men det antas flere sprekkesett. Dette, i tillegg til forvitring på sprekkenes overflater gjorde at GSI ble vurdert til å ligge rundt 50. Det er mulig at dette er en konservativ vurdering og at GSI verdien egentlig burde vært satt høyere. Til sammenligning har Grøneng (2010) bestemt GSI=85 for

massivt berg og $GSI=62$ for det oppsprukne berget over glideplanet. Siden den valgte GSI verdien gjelder for bergmassen nær skjærsonen kan det være naturlig at denne ligger rundt 50.

Kohesjonen og friksjonen som oppgis fra RocData og i tabell 10.3 er basert på en verdi σ_{3max} og overdekningen til glideplanet. Dette er nærmere forklart i Hoek (2000), men vil ikke bli gått inn på her. Disse verdiene er derimot avhengige av normalkraften på glideplanet, som igjen er avhengig av vanntrykket. Et eksempel på hvordan dette påvirker kohesjon og friksjon gis i kapittel 11.

En av begrensningene ved denne analysen er at prøvene har blitt delt i kategorier for å tilpasse bruddkriteriene bedre. Dette gjør også at man får færre målepunkter i hver av kategoriene, noe som gjør det vanskeligere å bedømme resultatenes troverdighet. Det optimale var om hele datasettet hadde vist mindre variasjon.

Hvis det viser seg at denne mørke og finkornete gneisen ligger som et lag langs glideplanene i fjellsiden kan dette modelleres som et eget lag. Da kan disse parameterne legges inn i modellen for å definere lagets egenskaper.

Før det blir gjort en numerisk analyse er det viktig med en grundig parameterstudie. Spesielt med tanke på variasjonen dataene viser. Det kan også lønne seg å utføre flere laboratorietester.

Normalkraftens påvirkning på kohesjon og friksjon

Når man beregner parameterne c og ϕ for bergmassen må det tas hensyn til normalspenningen σ_n . Som vist i Mohr-Coulomb-kriteriet, $\tau = c + \sigma_n \tan(\phi)$, vil kohesjon og friksjonsvinkel være avhengig av normalspenningen. Normalspenningen er igjen avhengig av den overdekkene bergmassen og nivået på grunnvannsspeilet. Ulike vanntrykk gir dermed ulike normalspenninger. For å finne korrekte verdier for kohesjon og friksjonsvinkel ved Åkneset er det valgt å sette opp et eksempel for å se på hvordan grunnvannstrykket påvirker normalspenningen og dermed også friksjonsvinkel og kohesjon ved et gitt profil.

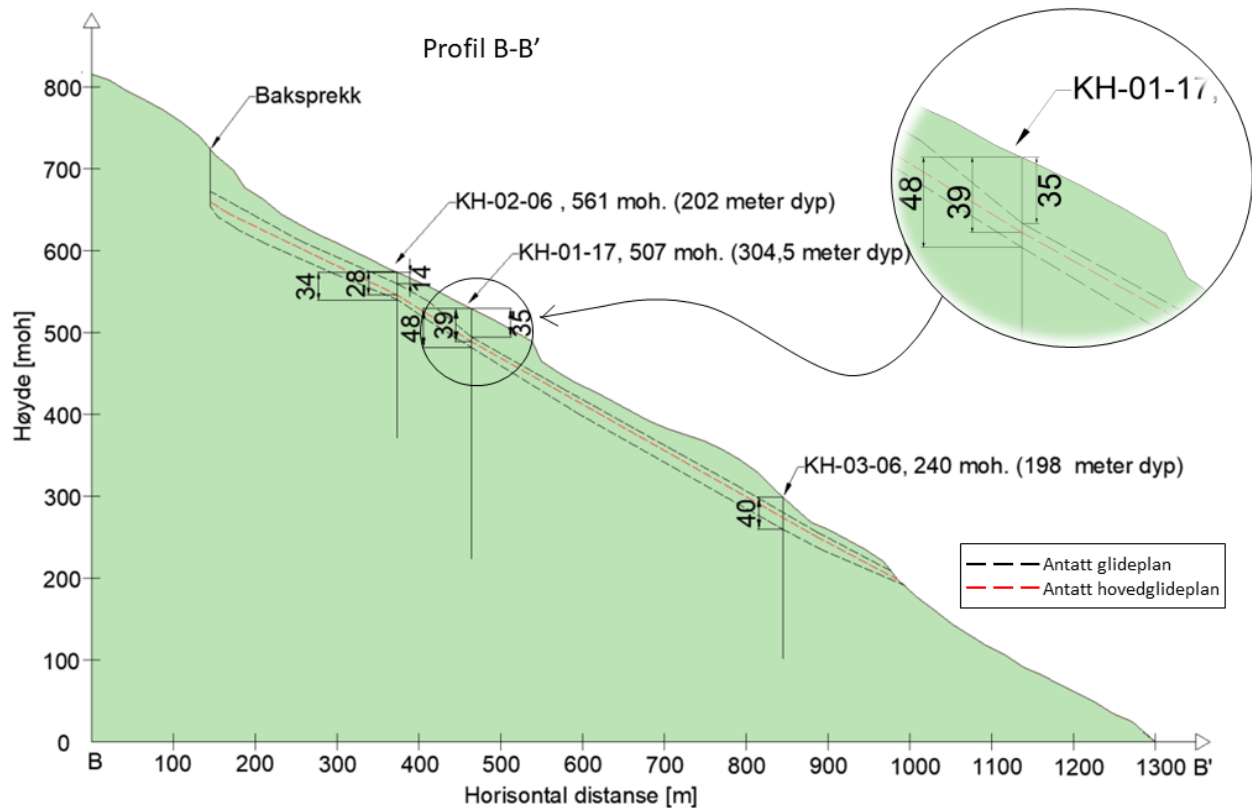
Kjernene i treksforsøket er hentet på omtrent 39 meters dyp i KH-01-17. Derfor velges det å beregne ut fra profil B-B' som inneholder borehullet med de testede kjernene. Det antas da at denne sonen ved 39 meters dyp er hovedglideplanet, figur 11.1. Det regnes altså med et forholdsvis grunt glideplan sammenlignet med det dypeste glideplanet tolket i profil C-C' som ligger på omtrent 120 meter under overflaten.

11.1 Normalspenningens variasjon med grunnvannstrykket

11.1.1 Valg av modell

Her er det valgt å vise normalspenningen for ulike vanntrykk ved profil B-B'. For å regne ut grunnvannstrykk og normalkraft for ulike grunnvannsnivåer er det valgt å sette opp en forenklet modell av profil B-B'. Dette for å forenkle geometrien slik at man enklere kan regne ut grunnvannstrykket og normalkraften på glideplanet. Figur 11.2 viser modellen med kreftene som virker på glideplanet. Areal, lengder og vinkler er beregnet ut fra den todimensjonale

AutoCAD modellen av profil B-B', disse verdiene sammen med parametere som beskriver bergmassen er gitt i tabell 11.1.



Figur 11.1: Profil B-B' viser området der kjernene i treaksforøket er hentet. Det er valgt å bruke dette glideplanet som utgangspunkt for videre utregninger.

Flere modeller for å beregne vanntrykket og normalkraften kan benyttes. Grøneng (2010) har tegnet ulike glideplan og scenario for å beregne skredets volum og presenterer disse uten en like definert baksprekk. I dette tilfelle er det valgt å bruke modellen i figur 11.2 som viser baksprekken som samler opp vann og skaper en horisontal kraft (v). Ved foten av skredområdet dreneres vannet ut og gjør at vanntrykket (u) får en trekantfordeling. Det kan vurderes om det blir riktig å tegne inn en så definert baksprekk da denne endrer karakter, fra å være mest definert i vest til å bli mindre definert i øst.

Hoek (2000) gir ligninger for utregning av krefter for skråninger med tensjonssprekk, ligning (11.1)-(11.4). Den horisontale kraften (v) vil ikke ha innvirkning på normalkraften på planet og regnes ikke med her, men må tas med når man beregner stabiliserende og destabiliserende krefter.

$$W_{\perp} = W \cos \psi_p = 1148,4 \text{ MN} \quad (11.2)$$

Vanntrykket

Vanntrykket antas som nevnt ovenfor å ha en trekantfordeling på grunn av baksprekken og drenering ved foten av skredet, som vist i figur 11.2. Dette setter opp et hydrostatisk trykk som vil avta ned mot skredfoten der vannet dreneres ut. Det horisontale trykket fra baksprekken antas å ikke ha betydning for normalkraften. Ligningen for grunnvannstrykket er gitt av (Hoek, 2000):

$$U = \frac{\gamma_w z_w A}{2} \quad (11.3)$$

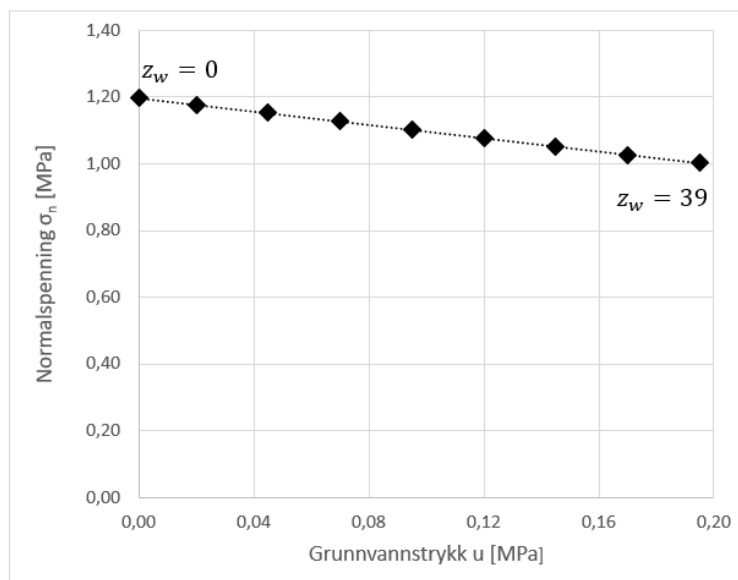
Normalkraften på glideplanet

Normalkraften som virker på glideplanet er gitt som en funksjon av vekten av overliggende masse og det motvirkende vanntrykket:

$$\sigma_n = \left(\frac{W_{\perp}}{A} - \frac{u}{A} \right) \quad (11.4)$$

11.1.2 Vanntrykkets påvirkning på normalkraften

Figur 11.3 viser den beregnede normalspenningen ved ulike vanntrykk. Vanntrykket er beregnet ut fra grunnvannsnivåer fra glideplanet ($z_w = 0$) og helt opp til overflaten ($z_w = 39$). Figur 11.3 viser hvordan normalspenningen avtar med økende vanntrykk for profil B-B. Ved et grunnvannsspeil ved glideplanet er $u = 0$ MN og $\sigma_n = 1,20$ MPa, mens ved et grunnvannsspeil ved overflaten er $u = 0,20$ MN og $\sigma_n = 1,0$.



Figur 11.3: Viser normalspenningens variasjon med grunnvannstrykket.

11.1.3 Friksjonsvinkel og kohesjon fra RocData

Når man vet normalspenningen kan friksjonsvinkelen og kohesjonen leses av i RocData. Her er det tatt utgangspunkt i verdiene fra det totale datasettet med alle målingene definert i forrige kapittel. Verdier er gitt for $z_w=0$ (null grunnvannstrykk) og med $z_w=39$ (grunnvannsnivå ved overflaten). Dette for å vise forskjellen på «best case» og «worst case» senario.

Tabell 11.2: Beregnede parametre for profil B-B' gitt ved grunnvannstand $z_w = 0$ og $z_w = 39$. Antar 1 meter dybde.

Parameter	Beskrivelse	Verdi		Enhet	Kilde
		$z_w = 0$	$z_w = 39$		
U	Kraften fra grunnvannstrykket på glideplanet	0	0,20	MN	lign.(11.3)
σ_n	Normalspenningen på glideplanet	1,20	1,00	MPa	lign.(11.4)
c	Kohesjon langs glideplanet	0,70	0,64	MN/m ²	RocData
ϕ	Friksjonsvinkel til glideplanet	45,2	46,74	MN/m ²	RocData

11.2 Oppsummerende bemerkninger

Til sammenligning har Grøneng (2010) beregnet $\sigma_n=1,8$ MPa ($\sigma_n = \gamma_{rock}h\cos\alpha_{slope} - \gamma_w h_w$) der $z_w=60$ m og glideplanet er lokalisert 110 meter under overflaten. Da med et glideplan som ligger 71 meter dypere enn i beregningen gitt ovenfor, noe som et stort utslag på vekten til bergmassen og resultatet.

Dette viser at ulike senario, ulike dyp til glideplanet og nivået på grunnvannsspeilet vil ha en betydning for normalkraften og dermed friksjon og kohesjon. Ved modellering må dette tas i betraktning og modellen må kobles til resultater fra felt.

Det er store usikkerheter ved denne beregningen. Både med tanke på lokasjonen til glideplanene og grunnvannsnivået. I tillegg er modellen forenklet til et rett glideplan med en enkel topografi, noe som ikke gjenspeiler den komplekse virkeligheten med flere glideplan og broer av intakt berg. Uansett var målet med denne delen å vise hvordan parameterne c og ϕ forandrer seg og at dette må tas hensyn til ved modellering.

Kapittel 12

Diskusjon

I dette kapittelet blir hovedpunktene i oppgaven diskutert. Hovedfokuset blir lagt på glideplanene og spesielt treaksialtestingen utført på laboratoriet, samt de faktorene som kan ha påvirket resultatet. Dette blir satt i sammenheng med betydningen av kjerneborehull og muligheten for drenering.

12.1 Kartlegging av glideplan

DMS-målinger fra borehullene har gjort det mulig å identifisere områder med bevegelse og mulige glideplan. Når det er kjent hvor bevegelsene forekommer er det enklere å sammenligne med kjernelogg, kjernebilder og televiewer i de aktuelle områdene. Flere steder sees en sammenheng mellom bevegelse og områder med knusningssoner, kjernetap, leirsoner og sprekkeparametere som indikerer lavere friksjon.

I profilene ble det valgt å trekke linjer mellom borehullene for å se sammenhengen mellom glideplanene funnet i borehullene. Som tidligere nevnt er et borehull endimensjonalt, noe som krever at informasjonen blir interpolert og tolket ut i bergmassen. Dette er kun basert på en subjektiv vurdering og er nødvendigvis ikke representativt for bergmassen. For enkelhets skyld, og på grunn av manglende kunnskap om glideplanenes utstrekning, er det valgt å tegne opp forholdsvis rette linjer som indikerer glideplanene. I virkeligheten kan glideplanene være mer undulerende flater adskilt av broer av intakt berg. Selv om kompleksiteten i skredområdet er større enn vist på profilene, gir de et godt innblikk i dybden til glideplanene. Det er også viktig å kunne feste informasjonen til profiler og kart slik at større sammenhenger kan visualiseres, selv om usikkerheten er stor.

En annen feilkilde ved profilene kan være at enkelte borehull er parallellforskjøvet bort til profillinjen, og at de derfor ikke ligger eksakt på profilet i virkeligheten. Dette anses likevel som nøyaktig nok til å gi et oversiktsbilde av et såpass stort område med komplekse strukturer.

Under kartleggingen av sonene med bevegelse ble det oppdaget at flere av glideplanene lå i det som så ut til å være en mørke og finkornet gneis, ofte i nærheten av bergartsgrenser. Vanligvis vil finkornete bergarter være sterkere enn grovkornede, men glimmerinnhold og påvirkning fra glideplanetens bevegelse kan ha svekket materialet. Derfor ble det i samråd med NGI bestemt å laborerieteste denne bergarten for å skaffe inputparametere til stabilitetsmodellen.

12.2 Laboriearbeid

12.2.1 Faktorer som påvirker laborieresultatet

Laborerietester er nyttige for å bestemme bergartens egenskaper, men det er viktig å være klar over begrensninger og faktorer som påvirker prøveresultatet. Dette innebærer blant annet fuktighetsgraden, kontaktflatens beskaffenhet, kjernenes lengde/diameterforhold, prøvestykkets volum og belastningshastigheten (Myrvang, 2001).

Som tidligere nevnt ble det i henhold til standarden valgt å vannmette prøvene for å skape forhold mest mulig like forholdene ved Åkneset. Flere av glideplanene ligger nær grunnvannspeilet. I tillegg antas det stor fuktighet over grunnvannspeilet på grunn av infiltrasjon og strømning i sprekker. Dette vil ha betydning for bergartsstyrken, men også fordi vanntrykket som bygges opp i skjærsonene blir en drivende kraft som over tid reduserer skjærstyrken på glideplanene.

Fuktighetsgraden til prøvene har liten betydning for E-modul, men har større påvirkning på Poissons forhold som øker betydelig med økende fuktighetsgrad (Myrvang, 2001). Dette kan være tilfellet for laborerietestene som er utført, da de har vist unormalt høye verdier for ν . Fuktigheten har også betydning for styrken. I forhold til tørre prøver kan styrken reduseres hele 40-60% på grunn av oppbygging av poretrykk når prøven lastsettes (Nilsen og Palmstrøm, 2000). For å finne ut hvor stor innvirkning dette har på bergartsstyrken hadde det vært interessant å teste det samme materialet i tørr tilstand.

At vannmettede prøver har innvirkning på de mekaniske egenskapene til bergarten gjør det vanskelig å sammenligne med tidligere resultater, der prøvene ikke har vært vannmettet. Fuktigheten, samt at kjernene er hentet fra området rundt skjærsonene kan være grunnen til at bergartsstyrken er lavere enn det tidligere laborerietester fra Åkneset viser.

Endeeffekter kan også påvirke prøveresultatet. Når en prøve lastes aksielt dannes spenninger i grensesjiktet mellom prøven og stålet på prøvemaskinen. Disse spenningene gir en «treksial effekt» som gjør at trykkfastheten øker (Myrvang, 2001). For å unngå endeeffekter kreves god preparering og riktig lengde-diameterforhold. Virkningen av endeeffekter vil strekke seg omtrent en diameter inn i prøvestykket og vil derfor ha en stor påvirkning når lengde-diameterforholdet er lite (Myrvang, 2001). På grunn av høy oppsprekking i bergarten som skulle laborerietestes var kjerneprøvene korte. For å oppfylle lengde-diameterkravet måtte diameteren reduseres til 40 mm og lengden til omtrent 93 mm. Siden lengde-diameterforholdet blir 2,3 og er innenfor standardens krav, antas derfor små endeeffekter.

Store prøver inneholder ofte flere geologiske svakheter enn mindre prøver. Derfor vil trykkfastheten og E-modulen til små prøver generelt være høyere enn for større kjerneprøver (Myrvang, 2001). Hoek og Brown (1980) antar en reduksjon i styrke med økende kjernestørrelse og har foreslått at den enaksiale trykkfastheten skal relateres til kjerner med diameter 50 mm. For kjerner med andre diametere angis en formel for å beregne styrkereduksjonen. Formelen er ikke en del av ISRM standarden, og det ble etter samtale med Gunnar Vistnes på laboratoriet besluttet å ikke benytte denne.

For at foliasjonen ikke skal ha innvirkning på resultatene er det en fordel med kjerner som har lengdeakse vinkelrett på foliasjonen. Foliasjonsvinkelen ble målt som et gjennomsnitt av alle kjerner til $61,5^\circ$ (vinkelen mellom lengdeaksen og foliasjonen). Det ble vurdert å bore ut kjernene på skrå for å få en større vinkel mellom lengdeakse og foliasjon, men kjernenes lengde og diameter gjorde det vanskelig. Det ble besluttet å ikke endre kjernenes vinkel. Resultatene viste at det var få kjerner med brudd langs foliasjonen. Enkelte brudd viste påvirkning fra foliasjonen uten at dette var dominerende. Brudd som ikke går langs foliasjonen indikerer at man har fått testet bergartens materialegenskaper.

12.2.2 Treksialtesting av KH-01-17

I treksialtesten ble det valgt å kjøre 3 serier á 3 kjerner, der hver av seriene ble påført ulike omslutningstrykk. På forhånd ble det antatt at gneisen ville være såpass hard og sprø at det ikke ville være mulig å utføre flere laststeg. Etter å ha testet den første kjernen treksialt ble det derimot oppdaget at berget var forholdsvis «seigt» og at det var mulig å kjøre to laststeg på samme kjerne. Dette ga et større datagrunnlag og gjorde det mulig å beregne eksakte friksjonsvinkler og kohesjon for disse kjernene.

Resultatet som ble tegnet opp som Mohr-sirkler viste stor spredning, men også lave verdier for m_i og σ_{ci} . Dette gjorde det vanskelig å tilpasse bruddkurven til samtlige prøver. Når man så på sammenhengen mellom styrken til bergarten og beliggenheten i borehullet kom det fram at de svakeste kjerne lå nærmest det antatte glideplanet, mens de sterkeste lå lengre unna, på grensen til den lyse og mer grovkornete gneisen. At ulikhetene er så store innenfor et område på seks meter kan skyldes inhomogeniteter i bergarten, nærheten til skjærsonene og vannmettingen av prøvene. Det antas at bevegelsen først skjedde i denne litt svakere bergarten og at denne glidningen igjen har skapt riss som har svekket bergarten ytterligere. Også vannføring langs glideplanet kan ha ført til forvitring og reduksjon av bergartsstyrken. Forvitrede sprekkeoverflater ble observert på kjernene. På forhånd ble det antatt at kjernene, spesielt de nærmest det antatt glideplanet, hadde et stort glimmerinnhold som var med på å svekke bergarten. XRD analyse viste et glimmerinnhold på rundt 20%, ikke et unormalt høyt glimmerinnhold.

På bakgrunn av dette ble det naturlig å dele inn i kategorier etter den relative styrken på bergarten og nærheten til glideplanet. Dette ga bedre tilpassede bruddkurver. I og med at disse bruddkurvene nå baserer seg på et redusert antall målinger blir de mindre troverdige. Det ble også gjort en samlet beregning for alle målingene for å enklere kunne sammenligne med

andre verdier, men som nevnt får man en dårlig tilpasset bruddkurve. Variasjonene gjør det vanskelig å bestemme verdier som representerer bergarten på en god måte, noe som kanskje må forventes når man tester berget så nære skjærsoner.

Om det viser seg at denne mørke og finkornete gneisen flere steder forekommer ved glidesonene og ligger som et svakt lag i bergmassen, kan dette legges inn i modellen. Dermed kan laboratorieresultatene benyttes til å beskrive denne bergmassens egenskaper. Ved bruk av resultatene til numerisk analyse vil den store usikkerheten til parameterne gjøre det nødvendig å utføre en grundig parameterstudie. Eventuelt må flere treaksialforsøk gjennomføres.

12.2.3 Enaksialtesting av kjerner fra KH-02-17

Kjernene fra KH-02-17 framsto som mer massiv og sterkere både på kjernebilder og ved observasjon sammenlignet med KH-01-17 som framstår mer porøs og svake. Denne lokasjonen ga ikke tilstrekkelig antall kjerner til å kunne kjøre en treaksiell testing som planlagt på forhånd. Derfor ble det besluttet å teste disse kjernene enaksielt.

Kjernene viser ikke den samme endringen i styrke i forhold til avstanden til det antatte glideplanet som i KH-01-17. For disse kjerne ligger trykkfastheten mellom 67,1-79,5 MPa, med én kjerne som skiller seg ut med en trykkfasthet på 126,6 MPa. Dette er høyere enn for KH-01-17, men likevel lavere enn det tidligere undersøkelser fra Åkneset viser. Poissons forholdstall er for flere av kjernene meget høye, noe som kan være forårsaket av inhomogeniteter. XRD analysen viste et høyt innhold av albitt. Glimmerinnholdet som på forhånd var antatt høyt lå på 15%. Som først antatt har disse kjernene en forholdsvis lav bergartsstyrke til å være gneis og er noe sterkere enn kjernene fra KH-01-17. Diskusjonene rundt styrken til bergmassen gitt i delkapittel 12.2.2 gjelder også for disse kjernene.

12.3 Verdien av kjerneboringer

Verdien av kjerneboringer er høy. Dette er en god metode for å avdekke hvordan forholdene er nedover i borehullet. Likevel er det enkelte begrensninger. Et endimensjonalt borehull vil ikke representere hele bergmassen og vil være svært påvirket av mindre geologiske strukturer som kan gi et feil bilde av bergmassen som helhet. Dette ser man for eksempel når GSI for bergmassen skal bestemmes. Ut fra kjerner med diameter på 63 mm må en tolkning gjøres av hvordan bergmassen er rundt. Flere borehull og vinklede borehull kan gjøre denne karakteriseringen enklere (Hoek, 2000).

Borehullene benyttes ikke bare til kjerne logging og borehullslogging, men også til overvåking av borehullene. Dette gjør at man blant annet har kontroll på bevegelsen og hvordan vannet strømmer.

Kjernene som tas ut gir også mulighet for å teste bergartens egenskaper på laboratoriet.

12.4 Sammenstilling av informasjon

Gjennom de siste årene har mange undersøkelser blitt gjennomført ved Åkenset. Dette har lagt grunnlaget for store mengder informasjon. Som diskutert på Åknes prosjektmøte våren 2019 er det en utfordring å klare å sammenstille den store datamengden. I og med at geologiske undersøkelser ofte baserer seg på tolkninger er det vanskelig å kunne være sikker på resultatet. Selv om det er store usikkerheter i de undersøkelsene som gjøres, både borehullslogging, geofysikk, laboratoriearbeid med mer, vil et større antall undersøkelser som underbygger hverandre gi et bedre grunnlag for å kunne tro på resultatene. Videre blir utfordringen å sammenstille dataene for å klare å visualisere hva resultatene betyr.

12.5 Effekten av drenering

Ut fra analysene gjort i denne oppgaven er det vanskelig å si noe om effekten av drenering. Likevel kan noen enkle antagelser nevnes. Som første punkt har glideplanets lokasjon i forhold til grunnvannsspeilet betydning. Grunnvannsspeilet vil fluktuerer med sesongene og dermed kan også avstanden til glideplanene endres gjennom året. Selv om grunnvannsspeilet skulle ligge under glideplanene antas det stor fuktighet i bergmassen over som følge av infiltrasjon og strømning i sprekkesoner. Som nevnt ovenfor viser laboratorietester på vannmettede kjerner en lav bergartsstyrke. Uten at det er testet tilsvarende materiale i tørr tilstand, sier som nevnt litteraturen at bergmassen vil svekkes ved vannmetting. Det er derfor rimelig å tro at de vannmettede kjernene testet på lab er svakere enn tørre. Å senke grunnvannsspeilet kan derfor gi en sterkere bergmasse som har lettere for å motstå skjærspenning fra glideplanet. Likevel vil nok den største effekten ligge i redusert poretrykk som øker friksjon langs glideplanet.

Konklusjon

Denne masteroppgaven har i hovedsak tatt for seg identifisering av glideplan i borehullene med DMS, og laboratorietesting av materiale tilknyttet disse skjærsonene. Dette har gitt noen konkluderende punkter:

- DMS med inklinometer har gjort det mulig å identifisere bevegelser i borehullene. Ved å se på korrelasjonen mellom DMS-målinger, kjernebilder, kjernelogg og televiwer er glideplan forsøkt identifisert.
- Det er flere klare indikasjoner på sammenhenger mellom DMS, kjernebilder, kjernelogger og televiwer. De tydeligste sonene med bevegelse sees ofte i sammenheng med tydelige sprekker, knusningssoner, kjernetap eller soner med sleppemateriale som gjenkjennes i loggene.
- På grunnlag av de identifiserte glideplanene er disse tegnet inn i profiler og det er gjort en tolkning av glideplanenes videre utstrekning mellom borehullene.
- Kartleggingen av soner med bevegelse viser at flere av glideplanene har sammenheng med en mørk og finkornet gneis. Denne bergarten er laboratorietestet for å skaffe inputparametere til modellering av berget rundt skjærsonene.
- For begge de testede lokasjonene viste laboratorieresultatene lav trykkfasthet og E-modul sammenlignet med gneis og andre laboratorieresultater fra Åkneset. Poissons forhold viste for flere av kjernene unormalt høye verdier. Dette kan skyldes inhomogeniteter i kjernene. Kjernene fra borehull KH-02-17 viste seg noe sterkere enn kjernene fra borehull KH-01-17.
- Treaksialtestene viste stor variasjon i dataene, og gjør de vanskelig å analysere. Styrken på kjernene ser ut til å ha sammenheng med nærheten til glideplanet, og gjorde at laboratorieresultatene ble delt inn i tre styrke kategorier ved analyse i RocData. På grunn av usikkerheten i dataene er det viktig å gjøre en grundig parameterstudie av hver enkelt parameter før numerisk modellering utføres.

- Analyse av dataene ble gjort i RocData. Dette ga Hoek-Brown konstanten for bergmassen (m_b) og materialkonstantene s og a . Selv om Hoek-Brown konstanten for intakt berg (m_i) og enaksiell trykkfasthet for intakt berg (σ_{ci}) varierer, er verdiene lave sammenlignet med andre resultater fra gneis og fra Åkneset.
- Eksakte verdier for kohesjon (c) og friksjonsvinkelen (ϕ) ble funnet direkte fra laboratorieresultatene, i de tilfellene kjernene ble utsatt for to laststeg i treaksforsøket. Disse parameterne er derimot avhengig av normalspenningen og da også beliggenheten til grunnvannsspeilet. Derfor er det ved numerisk analyse viktig å tilpasse disse verdiene til felldata.
- En naturlig årsak til at kjernene testet på laboratoriet har lavere styrke enn gneis vanligvis har og tidligere laboratorieundersøkelser av gneisen ved Åkneset, er at disse kjernene er vannmettet og hentet fra det som antas å være skjærsoner.
- Det var forventet et høyt glimmerinnhold nært glideplanene. XRD viste derimot et moderat glimmerinnhold på 15-21%, og ingen betydelig forskjell mellom kjernene.

Denne masteroppgaven har bidratt til å identifisere glideplan og skaffe nye parametere til numerisk modellering. Det kan forhåpentligvis bidra til å forbedre den geologiske modellen som igjen kan dras nytte av når det skal avgjøres om drenering vil være en effektiv løsning.

Forslag til videre arbeid

De følgende punktene gir forslag til videre arbeid.

- Borehullene fra 2018 skal etter planen instrumenteres med DMS sommeren 2019. Disse borehullene er plassert på vestsiden av skredområdet, mot Åknesrenna. Det vil være interessant å se hvor dypt bevegelsene ligger og om bevegelsesretningen heller mot Åknesrenna eller fjorden.
- Det hadde vært interessant å kjøre en treaksialtest på de samme kjernene i tørr tilstand for å se på effekten av vannmetting og hvor mye bergartens styrke reduseres. Dette er interessant med tanke på bergartens styrke i skjærsonen.
- Generelt kan mer laboratorietesting gjennomføres for å skaffe flere og sikrere parametere til numerisk modellering.
- Ved 69-70 meter i borehull KH-01-17 ligger en leirsone det kan være interessant å teste for svellende mineraler. Frisvellingstest samt XRD med identifikasjon av svellende mineraler kan utføres på dette materialet.
- Laboratorietestene har gitt informasjon om parametere som kan brukes i numerisk analyse. Et naturlig steg videre vil være å benytte parameterne i numeriske analyser ved Åkneset.
- På grunn av den store variasjonen i resultater indikerer dette en tilhørende usikkerhet knyttet til parameterne. Derfor bør det gjøres en grundig parameterstudie for hver enkelt parameter. Da kan det også vurderes om flere laboratorietester bør gjennomføres.

Referanser

- Alejano, L. R., Muralha, J., Ulusay, R., Li, C. C., Pérez-Rey, I., Karakul, H., Chryssanthakis, P. og Aydan, Ö. (2018) ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51(12), s. 3853–3859. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>.
- Bieniawski, Z. T. (1989) Role of rock mass classifications in site characterization and engineering design. I: *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: John Wiley & Sons, s. 5–26.
- Blikra, L. H., Kristensen, L. og Lovisolo, M. (2013) Subsurface monitoring of large rockslides in Norway: A key requirement for early warning. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*.
- Blikra, L. H. (2012a) Evaluering av drenering som risikoreduserende tiltak ved Åkneset. *Åknes Rapport 07 2012*. Åknes/Tafjord Beredskap IKS.
- Blikra, L. H. (2012b) The Aaknes Rockslide, Norway. I: *Landslides; types, mechanisms and modeling*. Cambridge University Press, s. 323–335.
- Blikra, L. H. (2017) *Tilføring og fjerning av vann som risikoreduserende tiltak i ustabile fjellparti: Eksempel fra Åknes og Veslemannen*. Presentasjon på Geofaredagen 2017.
- Bruland, A. (2016) Boring i fjell. I: *Anleggsteknikk GK- Kompendie del 1*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- CSG Srl (2019) *Our DMS Production*. URL: <http://www.csgrl.eu/eng/products.html> (Hentet: 12.02.2019).
- Elvebakk, H. (2008) *Borehullslogging, Åknes, Stranda kommune*. Rapport 2008.030. NGU.
- Elvebakk, H. (2013) *Borehullslogging i KH-08, Åknes, Stranda kommune, Møre og Romsdal*. Rapport 2013.032. NGU.
- Elvebakk, H. og Pless, G. (2018) *Borehullslogging Åknes, Stranda kommune, 2017-2018*. Rapport 2018.026. NGU.

- Aardal, I. B. (2007) *Åknes skredområde- analyse av korrelasjonar mellom borholsgeofysikk og bruddfrekvens frå kjernelogging*. Masteroppg. NTNU Institutt for geologi og bergteknikk.
- Ganerød, G. V. (2013) *Geological logging of drill cores from borehole KH-08-12 at Åknes, Møre og Romsdal, Western Norway*. Report 2013.039. Geological Survey of Norway.
- Ganerød, G. V., Grøneng, G., Aardal, I. B. og Kveldsvik, V. (2007) *Logging of drill cores from seven boreholes at Åknes, Stranda municipality, Møre and Romsdal County*. Report 2007.020. NGU.
- Ganerød, G. V., Grøneng, G., Rønning, J. S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Tønnesen, J. F., Kveldsvik, V., Eiken, T., Blikra, L. H. og Braathen, A. (2008) Geological model of the Åknes rockslide, western Norway. *Engineering Geology* 102(1), s. 1–18. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795208000276>.
- Goodman, R. E. (1989) *Introduction to rock mechanics*. New York.
- Grøneng, G. (2010) *Stability analyses of the Åknes Rock Slope, Western Norway*. Ph.d.-avh. Trondheim: Norwegian University of Science, Technology- Department of Geology og Mineral Resources Engineering.
- Grøneng, G., Christiansen, H., Nilsen, B. og Blikra, L. (2009a) Meteorological effects on seasonal displacements of the Åknes rockslide, western Norway. eng. *Landslides* 8(1), s. 1–15.
- Grøneng, G. og Nilsen, B. (2009) *Procedure for determining input parameters for Barton-Bandis joint shear strength formulation*. Tekn. rapp. Rep. 38. Trondheim: Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU.
- Grøneng, G., Nilsen, B. og Sandven, R. (2009b) Shear strength estimation for Åknes sliding area in western Norway. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, s. 479–488. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.10.006.
- Hoek, E. (2000) *Practical rock engineering*. Rocscience.
- Hoek, E. og Brown, E. (1980) *Underground Excavations in Rock*. London: Institution of Mining og Metallurgy.
- Hoek, E. (1983) Strength of jointed rock masses. Twenty- third Rankine Lecture 1983. *Géotechnique* 23(3), s. 187–223.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. og Corkum, B. (2002) Hoek-Brown Failure Criterion- 2002 Edition. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium 2002 Edition*, s. 267–273.
- Hole, J., Blikra, L. og Anda, E. (2011) *Scenario og prognoser for fjellskred og flodbølger fra Åknes og Hegguraksla, Rev. og utvida utg. av Åknes rapport 01.2010*. Rapport nr. Åknes 05.2011. Åknes/Tafjord beredskap.

-
- ISO (2017) ISO 14689. Geotechnical investigation and testing—Identification, description and classification of rock. *Standard* 1(2017-12-12).
- ISRM (1978a) International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 15(6), s. 319–368. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906278914729>.
- ISRM (1978b) Suggested Methods for Determining Sound Velocity. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006*, s. 55–58.
- ISRM (1979) Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006*, s. 137–140.
- ISRM (1983) Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 20(6), s. 285–290. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906283905983>.
- Kveldsvik, V., Eiken, T., Ganerød, G. V., Grøneng, G. og Ragvin, N. (2006) *Evaluation of movement data and ground conditions for the Åknes rock slide*. Tekn. rapp. Cape Town, South Africa: The South African Institute of Mining og Metallurgy.
- Kveldsvik, V., Nilsen, B., Einstein, H. H. og Nadim, F. (2008) Alternative approaches for analyses of a 100.000 m³ rock slide based on Barton–Bandis shear strength criterion. *Landslides* 5(2), s. 161–176. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0096-x>.
- Langeland, H. (2014) *Utvikling av revidert geologisk modell og stabilitetsanalyser for øvre deler av ustabil fjellside på Åknes*. Masteroppg. Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet - Institutt for geologi og bergteknikk.
- Langeland, H. (2018) *Drainage Åknes, Datareport core logging KH-01-2017*. Tekn. rapp. Upublisert. NGI.
- Langeland, H. (2019a) *Drainage Åknes, Data report core logging KH-01-18*. Tekn. rapp. Upublisert. NGI.
- Langeland, H. (2019b) *Drainage Åknes, Data report core logging KH-02-17*. Tekn. rapp. Upublisert. NGI.
- Langeland, H. (2019c) *Drainage Åknes, Data report core logging KH-02-18*. Tekn. rapp. Upublisert. NGI.
- Langeland, H. (2019d) *Mailkorrespondanse 31.05.2019 angående bevegelsen i borehull KH-03-06*.
- Lautro, O., Thorsnes, T. og Tveten, E. (1998) *Berggrunnskart Ålesund*.

- Li, C. C. (2017) *Rock Mechaniscs*. Kompendium TGB4210 Bergmekanikk gk. Trondheim: Norwegian University of Science og Technology (NTNU).
- Myrvang, A. (2001) *Bergmekanikk*. Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU. Trondheim.
- NGI (2015) *Bruk av Q-systemet- Bergmasseklassifisering og bergforsterkning*.
- NGU (2015a) *Optisk televiewer (OPTV)*. URL: <https://www.ngu.no/emne/optisk-televiewer-optv>.
- NGU (2015b) *XRD-analyse*. URL: <https://www.ngu.no/fagomrade/xrd-analyser>.
- NGU, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Statens landbruksforvaltning, Statens vegvesen, Jernbaneverket og Statens kartverk (2016) *Store fjellskred i Norge*.
- Nilsen, B. (2016) *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*. Trondheim: NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk.
- Nilsen, B. (2017) Rock slope stability analysis according to Eurocode 7, discussion of some dilemmas with particular focus on limit equilibrium analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76(4), s. 1229–1236. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0928-9>.
- Nilsen, B. og Palmstrøm, A. (2000) *Engineering geology and rock engineering, Handbook No 2*. Oslo: Norwegian Group for Rock Mechanics (NBG).
- Nilsen, B. og Thidemann, A. (1993) *Rock Engineering. I: Vol. 9. Hydropower Development*. Trondheim: Norwegian Institute of Technology Division of Hydraulic Engineering.
- NVE (2017) Fjellskred, overvåking og beredskap. *Faktaark 5/2017*.
- NVE (2018) *Åknes*. URL: <https://www.nve.no/flaum-og-skred/fjellskredovervaking/%C3%A5knes/> (Hentet: 11.09.2018).
- NVE (2019) *Data fra Åknesprosjektets ftp server*.
- Palmström, A. og Stille, H. (2015) *Rock Engiennering (2nd Edition). I: Rock Engineering (2nd Edition)*. I. Publishing (red.). ICE Publishing, s. 7–37.
- Palmstrom, A. (2005) Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- RocScience Inc. (2017) *RocData version 5.009*. URL: <https://www.rocscience.com/software/rocddata> (Hentet: 03.05.2019).
- SVV (2016) *Laboratorieundersøkelser, retningslinje, Håndbok R2010*. https://www.vegvesen.no/_attachment/185231/binary/1090658. Hentet 19.10.2018.
- Tønset, L. (2018) *Åknes skredområde- sammenstilling og diskusjon av informasjon fra kjerneboring*. Upublisert. Prosjektoppgave. Trondheim: Institutt for geovitenskap og petroleum. Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet.

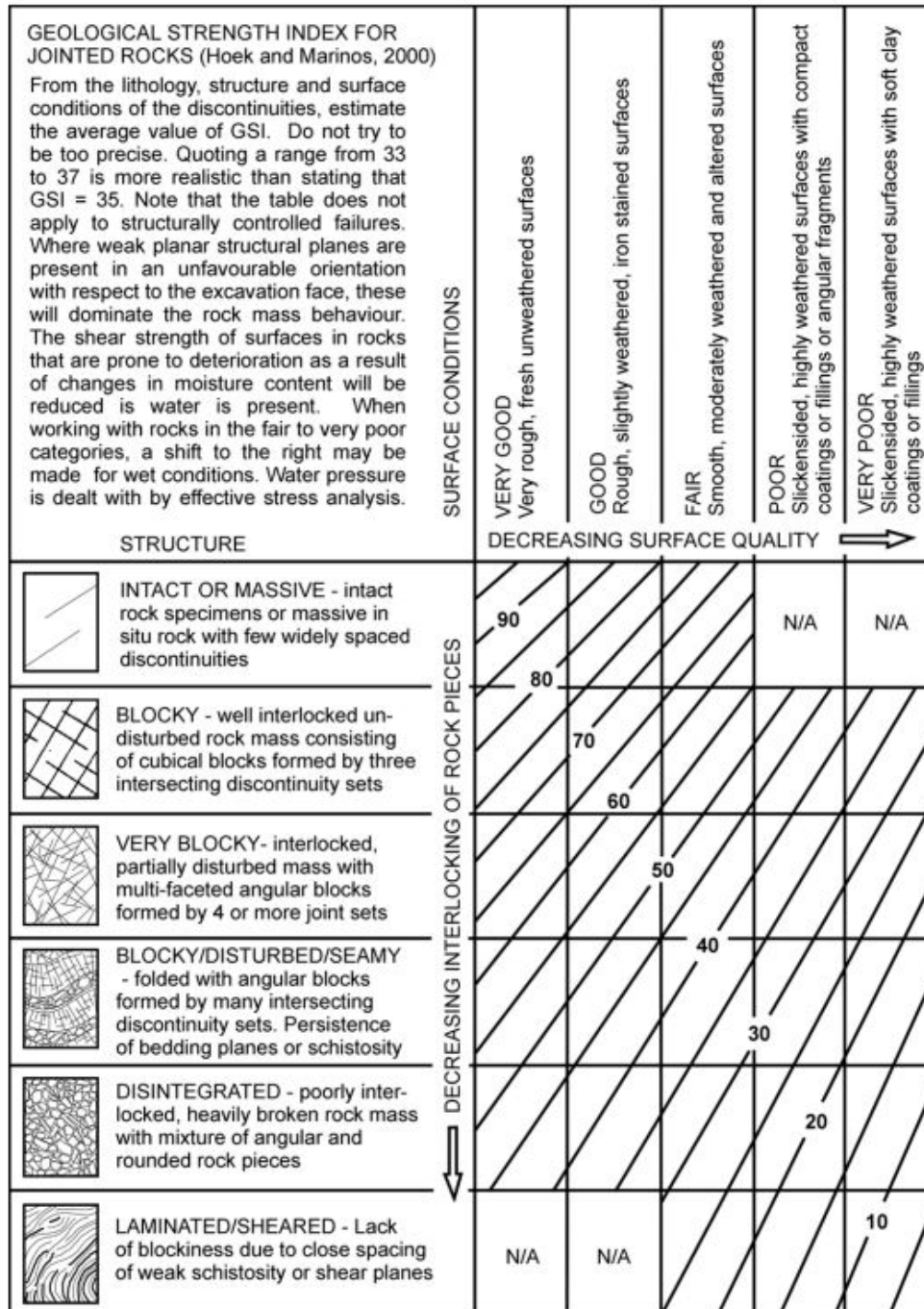
Vorren, T. O., Mangerud, J., Blikra, L. H., Nesje, A. og Sveian, H. (2013) Kapittel 16: Norge av i dag trer frem. I: *Landet blir til: Norges geologi*. Trondheim: Norsk Geologisk Forening (NGF).

Wyllie, D. C. og Mah, C. w. (2004) *Rock slope engineering : civil and mining*. 4th ed. Spon Press.

Vedlegg

Vedlegg **A**

Geological strength index (GSI)



Figur A.1: Bestemmelse av GSI (Hoek, 2000).

Sprekkeparametre

Tabellverdier for sprekkeparametrene, J_r og J_a og hentet fra NGIs håndbok «Bruk av Q-systemet».

3 $J_r =$ Sprekkeruhestall		J_r
<i>a) Bergveggkontakt, og b) Bergveggkontakt før skjærbevegelsen har gått 10 cm</i>		
A	Diskontinuerlige sprekker	4
B	Ru eller ujevn, bølgete	3
C	Glatt, bølgete	2
D	Glidespeil, bølgete	1,5
E	Ru, ujevn, plan	1,5
F	Glatt, plan	1
G	Glidespeil, plan	0,5
Merk: i) Beskrivelse henviser til småskalaegenskaper og mellomskalaegenskaper, i den rekkefølgen		
<i>c) Ingen bergkontakt ved skjærbevegelse</i>		
H	Sone som inneholder leirfylling tykk nok til å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon	1
Merk: ii) Legg til 1 hvis gjennomsnittlig avstand i det relevante sprekkesettet er mer enn 3 m (avhenger av størrelsen på tunnelåpningen) iii) $J_r = 0,5$ kan brukes for plane glidespeil med lineasjon, forutsatt at lineasjonen er orientert i sannsynlig bevegelsesretning		

4 $J_a =$ Tall for sprekkefylling		Φ_r	J_a
a) Bergkontakt (Ingen mineralfylling, bare belegg)			
A	Sammenvokste sprekker med harde mineraler som kvarts eller epidot.		0,75
B	Uomvandlede sprekkeflater, bare overflateoksidasjon.	25-35°	1
C	Svakt omvandlede sprekkeflater. Uoppbløtellig mineralbelegg, sandpartikler, oppknust berg uten leir.	25-30°	2
D	Siltig eller sandig sprekkebelegg, litt leir (ikke svellende).	20-25°	3
E	Oppbløtellig leirbelegg med lav friksjon, f.eks. kaolinitt eller glimmer. Også kloritt, talk gips, grafit osv. og små mengder svelleleire.	8-16°	4
b) Bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon (tynn mineralfylling)			
F	Sandige partikler, oppknust berg, ikke leir.	25-30°	4
G	Sterkt overkonsolidert, uoppbløtellig fylling av leirmineraler, (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	16-24°	6
H	Middels eller litt overkonsolidert fylling av oppbløtellig leirmateriale (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	12-16°	8
J	Fylling av svelleleire, dvs. montmorillonitt (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse). J_a -verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon (tykk mineralfylling)			
K	Soner og bånd av desintegrert eller knust berg. Sterkt overkonsolidert, uoppbløtellig fylling.	16-24°	6
L	Soner og bånd av knust eller desintegrert berg og leir. Middels til litt overkonsolidert uoppbløtellig fylling.	12-16°	8
M	Soner og bånd av leir eller knust eller desintegrert berg. J_a -verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
N	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Sterkt overkonsolidert.	12-16°	10
O	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Middels-til-lav overkonsolidering	12-16°	13
P	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Svelleleire. J_a avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	13-20

Inklinometermålinger fra DMS

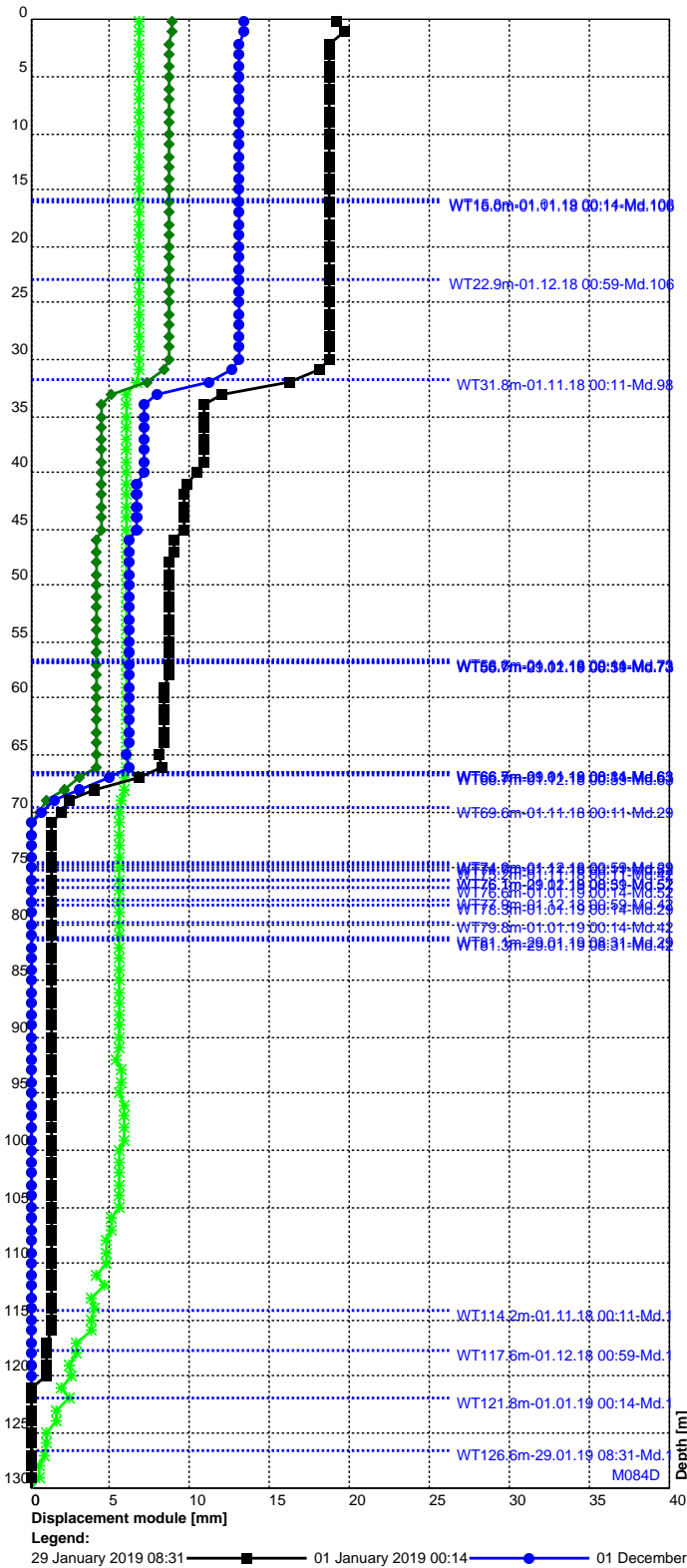
Inneholder:

- **KH-02-17:** DMS AKN009-130-0918: Module displacement - CumulativeReport N. KH-02-17 Third Upper - 29.01.2019 08:31
- **KH-02-17:** DMS AKN009-130-0918: Polar diagram - CumulativeReport N. KH-02-17 Third Upper - 29.01.2019 08:31
- **KH-01-17:**DMS AKN008-105-0918: Module displacement - CumulativeReport N. 2018-2019 - 14/01/2019 00.36
- **KH-01-17:** DMS AKN008-105-0918: Polar diagram - CumulativeReport N. 2018-2019 - 14/01/2019 00.36
- **KH-01-12:**DMS AKU005-150-0915: North displacement - CumulativeReport N. KH-01-12 Åknes new upper borehole - 01.01.2019 00:36
- **KH-01-12:**DMS AKU005-150-0915: Polar diagram - CumulativeReport N. KH-01-12 Åknes new upper borehole - 01.01.2019 00:36
- **KH-03-06:**DMS AKL004-120-0915: Module displacement - CumulativeReport N. KH-03-06 - Nedre Borehull 76mm - 01.01.2019 00:47
- **KH-03-06:**DMS AKL004-120-0915: Polar diagram - CumulativeReport N. KH-03-06 - Nedre Borehull 76mm - 01.01.2019 00:47
- **KH-02-06:**DMS AKM006-120-0915: Module displacement - CumulativeReport N. KH-02-06 Åknes Middle borehole - 01.01.2019 01:01
- **KH-02-06:**DMS AKM006-120-0915: Polar diagram - CumulativeReport N. KH-02-06 Åknes Middle borehole - 01.01.2019 01:01

(Hentet fra NVE (2019))

DMS AKN009-130-0918: Module displacement - Cumulative Report N. KH-02-17 Third Upper - 29.01.2019 08:31

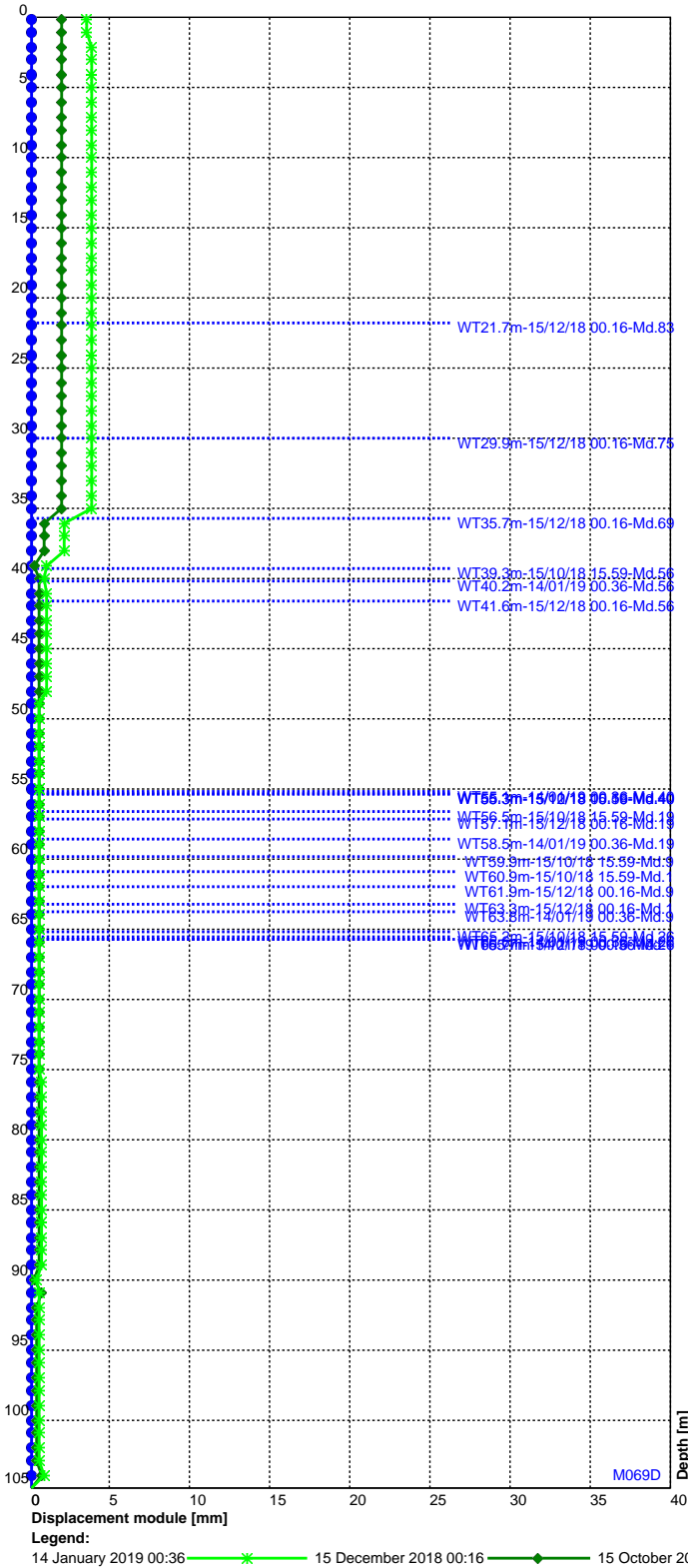
Contractor: NVE
 Site: BH2/17
 Project: Åknes drainage project
 Monitoring interval: 0-130 mbgl
 Installation date: 30.09.2018
 Calibration date: 15.10.2018 08:54
 Notes: DMS container solution



Depth [m]	Displ. [mm]	Depth [m]	Displ. [mm]
0.0	19.23	80.0	1.30
1.0	19.62	81.0	1.30
2.0	18.78	82.0	1.30
3.0	18.78	83.0	1.30
4.0	18.78	84.0	1.30
5.0	18.78	85.0	1.30
6.0	18.78	86.0	1.30
7.0	18.78	87.0	1.30
8.0	18.78	88.0	1.30
9.0	18.78	89.0	1.30
10.0	18.78	90.0	1.30
11.0	18.78	91.0	1.30
12.0	18.78	92.0	1.30
13.0	18.78	93.0	1.30
14.0	18.78	94.0	1.30
15.0	18.78	95.0	1.30
16.0	18.78	96.0	1.30
17.0	18.78	97.0	1.30
18.0	18.78	98.0	1.30
19.0	18.78	99.0	1.30
20.0	18.78	100.0	1.30
21.0	18.78	101.0	1.30
22.0	18.78	102.0	1.30
23.0	18.78	103.0	1.30
24.0	18.78	104.0	1.30
25.0	18.78	105.0	1.30
26.0	18.78	106.0	1.30
27.0	18.78	107.0	1.30
28.0	18.78	108.0	1.30
29.0	18.78	109.0	1.30
30.0	18.78	110.0	1.30
31.0	18.17	111.0	1.30
32.0	16.31	112.0	1.30
33.0	11.96	113.0	1.30
34.0	10.87	114.0	1.30
35.0	10.87	115.0	1.30
36.0	10.87	116.0	1.30
37.0	10.87	117.0	1.10
38.0	10.87	118.0	1.10
39.0	10.87	119.0	1.10
40.0	10.42	120.0	1.10
41.0	9.87	121.0	0.00
42.0	9.58	122.0	0.00
43.0	9.58	123.0	0.00
44.0	9.58	124.0	0.00
45.0	9.58	125.0	0.00
46.0	9.02	126.0	0.00
47.0	9.02	127.0	0.00
48.0	8.75	128.0	0.00
49.0	8.75	129.0	0.00
50.0	8.75		
51.0	8.75		
52.0	8.75		
53.0	8.75		
54.0	8.75		
55.0	8.75		
56.0	8.75		
57.0	8.75		
58.0	8.75		
59.0	8.41		
60.0	8.41		
61.0	8.41		
62.0	8.41		
63.0	8.41		
64.0	8.41		
65.0	8.01		
66.0	8.23		
67.0	6.81		
68.0	4.07		
69.0	2.40		
70.0	1.99		
71.0	1.30		
72.0	1.30		
73.0	1.30		
74.0	1.30		
75.0	1.30		
76.0	1.30		
77.0	1.30		
78.0	1.30		
79.0	1.30		

DMS AKN008-105-0918: Module displacement - Cumulative
Report N. 2018-2019 - 14/01/2019 00.36

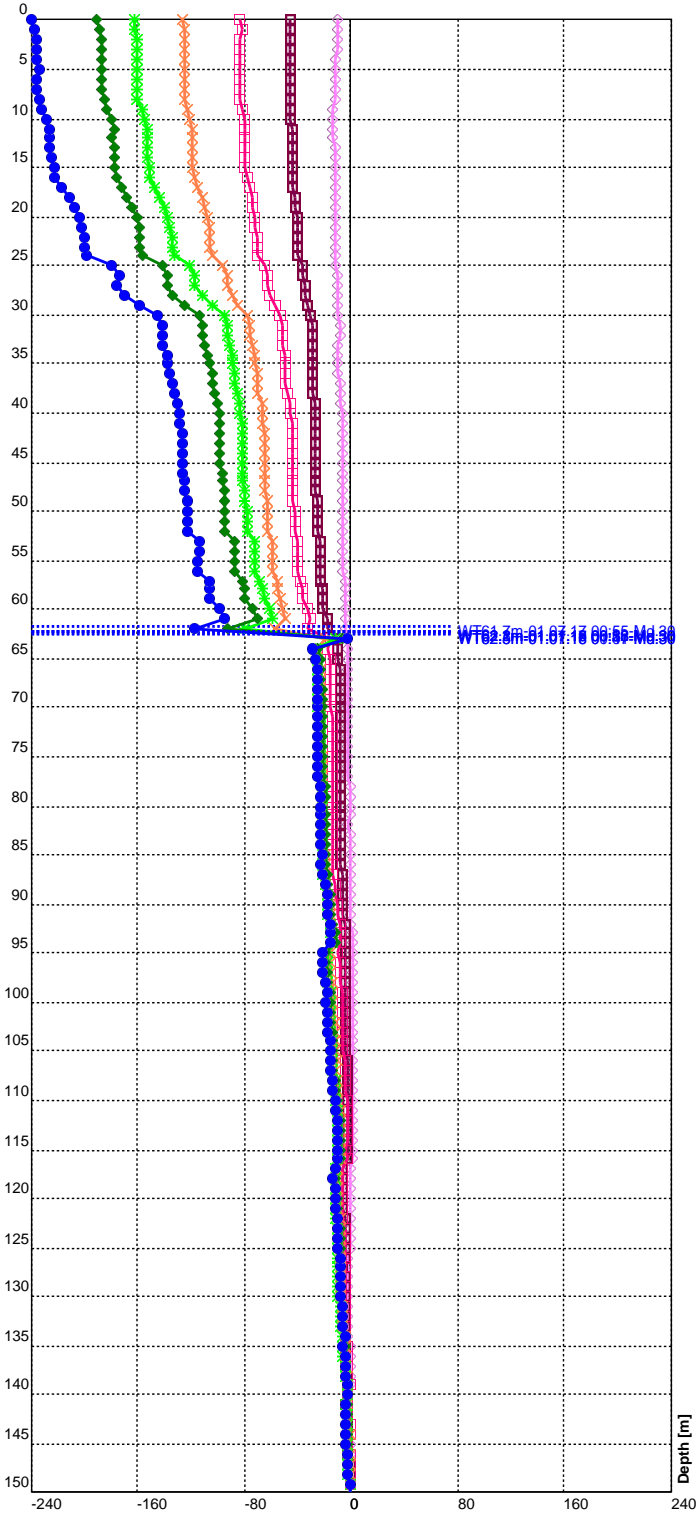
Contractor: NVE
 Site: BH1/17
 Project: Åknes drainage project
 Monitoring interval: 0-105 m bgl
 Installation date: 29/09/2018
 Calibration date: 15/10/2018 08.55
 Notes: DMS container solution



Depth [m]	Displ. [mm]	Depth [m]	Displ. [mm]
0.0	3.61	80.0	0.77
1.0	3.61	81.0	0.77
2.0	3.83	82.0	0.77
3.0	3.83	83.0	0.77
4.0	3.83	84.0	0.77
5.0	3.83	85.0	0.69
6.0	3.83	86.0	0.69
7.0	3.83	87.0	0.69
8.0	3.83	88.0	0.69
9.0	3.83	89.0	0.69
10.0	3.83	90.0	0.32
11.0	3.83	91.0	0.54
12.0	3.83	92.0	0.54
13.0	3.83	93.0	0.54
14.0	3.83	94.0	0.54
15.0	3.83	95.0	0.54
16.0	3.83	96.0	0.54
17.0	3.83	97.0	0.54
18.0	3.83	98.0	0.54
19.0	3.83	99.0	0.54
20.0	3.83	100.0	0.54
21.0	3.83	101.0	0.54
22.0	3.83	102.0	0.54
23.0	3.83	103.0	0.54
24.0	3.83	104.0	0.89
25.0	3.83		
26.0	3.83		
27.0	3.83		
28.0	3.83		
29.0	3.83		
30.0	3.83		
31.0	3.83		
32.0	3.83		
33.0	3.83		
34.0	3.83		
35.0	3.83		
36.0	2.19		
37.0	2.19		
38.0	2.19		
39.0	1.00		
40.0	0.91		
41.0	1.01		
42.0	1.01		
43.0	1.01		
44.0	1.01		
45.0	1.01		
46.0	1.01		
47.0	1.01		
48.0	1.01		
49.0	0.53		
50.0	0.53		
51.0	0.53		
52.0	0.53		
53.0	0.53		
54.0	0.53		
55.0	0.53		
56.0	0.53		
57.0	0.53		
58.0	0.53		
59.0	0.53		
60.0	0.53		
61.0	0.53		
62.0	0.53		
63.0	0.53		
64.0	0.53		
65.0	0.53		
66.0	0.53		
67.0	0.53		
68.0	0.53		
69.0	0.53		
70.0	0.53		
71.0	0.53		
72.0	0.53		
73.0	0.53		
74.0	0.53		
75.0	0.53		
76.0	0.77		
77.0	0.77		
78.0	0.77		
79.0	0.77		

DMS AKU005-150-0915: North displacement - Cumulative
Report N. KH-01-12 Åknes new upper borehole - 01.01.2019 00:36

Contractor: NVE
 Site: Aknes Upper 2013
 Project: 1IMT+2IUT250+147IT
 Monitoring interval: 0-150m bgl
 Installation date: 22.05.2014
 Calibration date: 24.09.2015 08:42
 Notes:

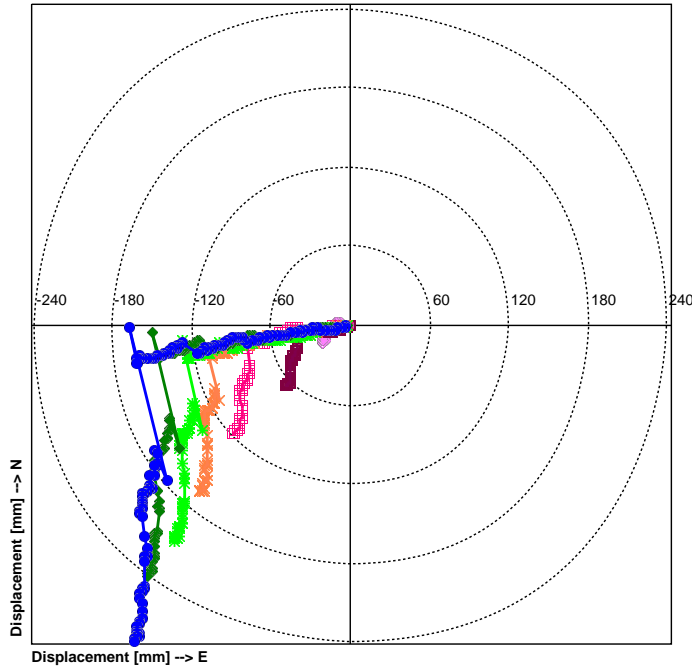


Depth [m]	Displ. [mm]	Depth [m]	Displ. [mm]
0.0	-238.88	80.0	-23.12
1.0	-236.82	81.0	-22.70
2.0	-235.98	82.0	-22.64
3.0	-235.10	83.0	-22.58
4.0	-234.76	84.0	-21.78
5.0	-234.23	85.0	-21.27
6.0	-234.36	86.0	-21.73
7.0	-235.61	87.0	-20.83
8.0	-233.88	88.0	-19.31
9.0	-231.19	89.0	-17.87
10.0	-227.34	90.0	-17.38
11.0	-225.28	91.0	-17.21
12.0	-226.36	92.0	-15.83
13.0	-224.95	93.0	-14.93
14.0	-224.66	94.0	-14.17
15.0	-222.99	95.0	-20.86
16.0	-221.40	96.0	-20.86
17.0	-217.03	97.0	-20.08
18.0	-210.97	98.0	-18.89
19.0	-206.36	99.0	-17.85
20.0	-203.04	100.0	-18.12
21.0	-200.99	101.0	-16.96
22.0	-200.12	102.0	-16.53
23.0	-198.87	103.0	-16.37
24.0	-197.32	104.0	-15.71
25.0	-178.83	105.0	-15.21
26.0	-174.11	106.0	-14.77
27.0	-175.02	107.0	-14.73
28.0	-169.78	108.0	-13.79
29.0	-159.03	109.0	-13.31
30.0	-144.72	110.0	-11.81
31.0	-142.10	111.0	-10.88
32.0	-140.71	112.0	-9.99
33.0	-140.36	113.0	-10.00
34.0	-137.71	114.0	-9.54
35.0	-136.64	115.0	-9.78
36.0	-134.72	116.0	-9.17
37.0	-133.15	117.0	-11.93
38.0	-132.28	118.0	-12.36
39.0	-129.81	119.0	-11.48
40.0	-128.07	120.0	-11.00
41.0	-127.37	121.0	-10.77
42.0	-126.80	122.0	-10.32
43.0	-126.76	123.0	-9.21
44.0	-126.74	124.0	-8.54
45.0	-126.70	125.0	-8.99
46.0	-125.98	126.0	-8.34
47.0	-124.94	127.0	-8.30
48.0	-123.98	128.0	-7.73
49.0	-123.07	129.0	-7.52
50.0	-121.85	130.0	-7.13
51.0	-122.90	131.0	-6.59
52.0	-122.95	132.0	-5.65
53.0	-113.88	133.0	-5.58
54.0	-113.88	134.0	-4.27
55.0	-114.23	135.0	-4.88
56.0	-114.14	136.0	-4.55
57.0	-106.29	137.0	-3.99
58.0	-105.53	138.0	-3.18
59.0	-104.83	139.0	-1.66
60.0	-96.98	140.0	-2.04
61.0	-94.91	141.0	-3.12
62.0	-117.25	142.0	-3.00
63.0	-2.09	143.0	-2.89
64.0	-27.63	144.0	-2.93
65.0	-25.57	145.0	-3.32
66.0	-24.53	146.0	-2.79
67.0	-24.57	147.0	-1.49
68.0	-23.70	148.0	-1.78
69.0	-24.71	149.0	-0.57
70.0	-24.71		
71.0	-24.06		
72.0	-24.08		
73.0	-24.16		
74.0	-25.06		
75.0	-24.26		
76.0	-24.36		
77.0	-23.80		
78.0	-23.19		
79.0	-22.84		

Displacement [mm] --> N
 Legend:
 01 January 2019 00:36 —●— 01 July 2018 00:22 —◆— 01 January 2018 00:47 —✱— 01 July 2017 00:55 —✕—
 01 January 2017 00:13 —□— 01 July 2016 01:01 —■— 01 January 2016 00:58 —◇—

DMS AKU005-150-0915: Polar diagram - Cumulative
Report N. KH-01-12 Åknes new upper borehole - 01.01.2019 00:36

Contractor: NVE
 Site: Aknes Upper 2013
 Project: 1IMT+2IUT250+147IT
 Monitoring interval: 0-150m bgl
 Installation date: 22.05.2014
 Calibration date: 24.09.2015 08:42
 Notes:



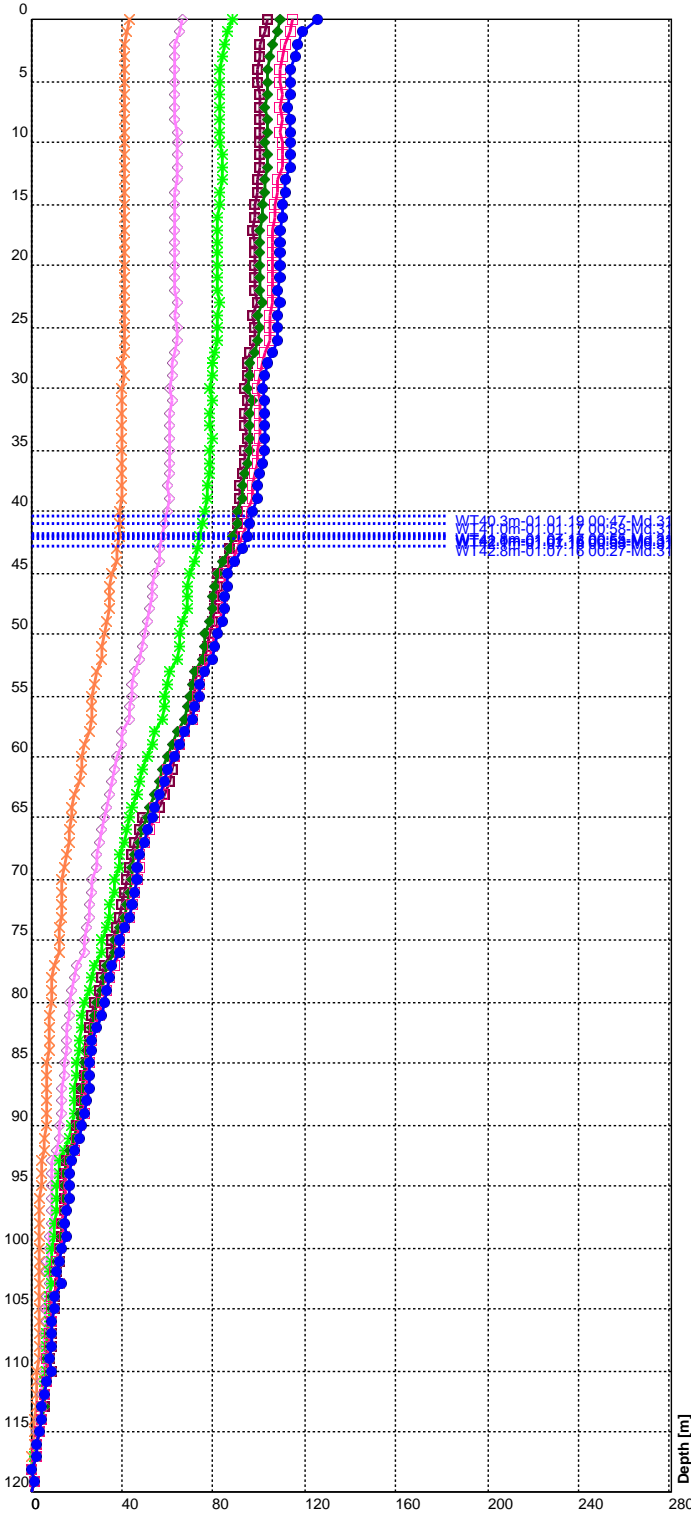
East [mm]	North [mm]	East [mm]	North [mm]
-162.9	-238.88	-145.2	-23.12
-162.5	-236.82	-144.2	-22.70
-162.1	-235.98	-143.0	-22.64
-162.1	-235.10	-141.9	-22.58
-162.1	-234.76	-140.8	-21.78
-162.0	-234.23	-139.2	-21.27
-160.6	-234.36	-138.7	-21.73
-159.8	-235.61	-137.4	-20.83
-158.9	-233.88	-136.5	-19.31
-160.9	-231.19	-135.4	-17.87
-161.1	-227.34	-132.6	-17.38
-160.3	-225.28	-131.4	-17.21
-159.5	-226.36	-130.4	-15.83
-159.8	-224.95	-129.3	-14.93
-158.7	-224.66	-127.8	-14.17
-157.6	-222.99	-115.0	-20.86
-157.8	-221.40	-115.0	-20.86
-156.9	-217.03	-113.7	-20.08
-158.1	-210.97	-111.3	-18.89
-158.8	-206.36	-109.8	-17.85
-158.6	-203.04	-108.6	-18.12
-157.9	-200.99	-107.7	-16.96
-157.8	-200.12	-105.8	-16.53
-156.1	-198.87	-103.9	-16.37
-155.4	-197.32	-101.7	-15.71
-155.4	-178.83	-100.4	-15.21
-155.3	-174.11	-99.2	-14.77
-153.6	-175.02	-96.9	-14.73
-153.1	-169.78	-95.5	-13.79
-155.8	-159.03	-94.2	-13.31
-158.4	-144.72	-92.8	-11.81
-159.0	-142.10	-91.6	-10.88
-159.0	-140.71	-89.1	-9.99
-159.0	-140.36	-87.5	-10.00
-158.4	-137.71	-86.2	-9.54
-158.1	-136.64	-84.1	-9.78
-158.2	-134.72	-82.1	-9.17
-158.3	-133.15	-79.5	-11.93
-158.3	-132.28	-77.1	-12.36
-157.7	-129.81	-74.8	-11.48
-157.8	-128.07	-72.7	-11.00
-157.8	-127.37	-69.8	-10.77
-157.4	-126.80	-67.6	-10.32
-156.7	-126.76	-65.3	-9.21
-155.3	-126.74	-62.9	-8.54
-154.8	-126.70	-60.3	-8.99
-154.3	-125.98	-57.9	-8.34
-154.3	-124.94	-55.9	-8.30
-152.7	-123.98	-53.7	-7.73
-151.7	-123.07	-51.4	-7.52
-151.4	-121.85	-48.4	-7.13
-151.4	-122.90	-45.5	-6.59
-149.8	-122.95	-42.1	-5.65
-151.4	-113.88	-39.7	-5.58
-149.0	-113.88	-37.4	-4.27
-149.0	-114.23	-35.1	-4.88
-147.2	-114.14	-33.3	-4.55
-147.6	-106.29	-31.2	-3.99
-145.7	-105.53	-28.8	-3.18
-145.8	-104.83	-27.7	-1.66
-146.6	-96.98	-24.1	-2.04
-147.4	-94.91	-22.3	-3.12
-138.7	-117.25	-19.9	-3.00
-167.4	-2.09	-16.9	-2.89
-161.2	-27.63	-14.5	-2.93
-160.8	-25.57	-12.0	-3.32
-160.7	-24.53	-9.6	-2.79
-160.0	-24.57	-5.7	-1.49
-160.0	-23.70	-4.3	-1.78
-158.5	-24.71	-2.8	-0.57
-158.5	-24.71		
-157.7	-24.06		
-156.9	-24.08		
-154.4	-24.16		
-153.1	-25.06		
-151.9	-24.26		
-150.0	-24.36		
-148.1	-23.80		
-146.5	-23.19		
-146.4	-22.84		

Values are sorted by depth

Legend:
 01 January 2019 00:36 —●— 01 July 2018 00:22 —◆— 01 January 2018 00:47 —✱— 01 July 2017 00:55 —✕—
 01 January 2017 00:13 —□— 01 July 2016 01:01 —■— 01 January 2016 00:58 —◇—

DMS AKL004-120-0915: Module displacement - Cumulative
Report N. KH-03-06 - Nedre Borehull 76mm - 01.01.2019 00:47

Contractor: NVE
 Site: Aknes Lower
 Project: 1 IMT + 2IUT100 + 117 IT
 Monitoring interval: 0-120 m bgl
 Installation date: 04.08.2015
 Calibration date: 18.09.2015 09:00
 Notes: Borehole depth = 197.30

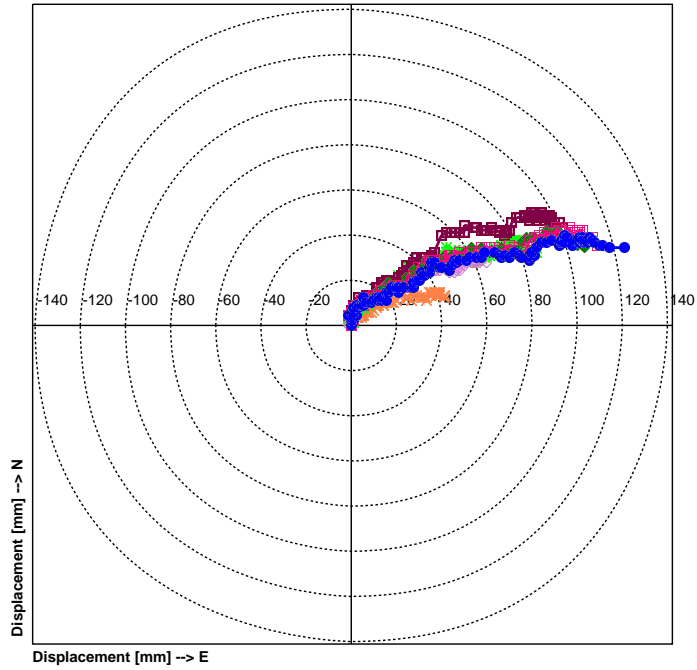


Depth [m]	Displ. [mm]	Depth [m]	Displ. [mm]
0.0	125.91	80.0	32.25
1.0	119.34	81.0	30.89
2.0	116.91	82.0	29.11
3.0	115.86	83.0	27.19
4.0	113.83	84.0	26.85
5.0	113.68	85.0	26.09
6.0	113.62	86.0	26.09
7.0	112.78	87.0	26.03
8.0	113.33	88.0	24.38
9.0	113.33	89.0	23.95
10.0	113.66	90.0	22.23
11.0	113.66	91.0	20.99
12.0	113.66	92.0	19.60
13.0	111.51	93.0	17.86
14.0	111.35	94.0	17.15
15.0	110.57	95.0	16.58
16.0	110.13	96.0	16.80
17.0	109.19	97.0	16.31
18.0	109.44	98.0	15.20
19.0	109.44	99.0	15.69
20.0	109.44	100.0	13.60
21.0	109.01	101.0	12.78
22.0	108.62	102.0	11.80
23.0	109.12	103.0	13.26
24.0	108.02	104.0	10.41
25.0	108.22	105.0	10.41
26.0	107.73	106.0	9.84
27.0	105.46	107.0	8.85
28.0	103.94	108.0	9.03
29.0	103.09	109.0	8.42
30.0	102.03	110.0	9.45
31.0	103.04	111.0	7.40
32.0	102.62	112.0	6.15
33.0	102.57	113.0	5.46
34.0	102.88	114.0	5.26
35.0	102.18	115.0	4.29
36.0	101.40	116.0	2.92
37.0	100.39	117.0	2.43
38.0	99.40	118.0	0.27
39.0	99.22	119.0	2.11
40.0	97.07		
41.0	96.58		
42.0	94.60		
43.0	92.36		
44.0	89.57		
45.0	86.54		
46.0	86.54		
47.0	85.60		
48.0	85.44		
49.0	83.81		
50.0	81.71		
51.0	80.77		
52.0	79.32		
53.0	76.07		
54.0	74.43		
55.0	73.80		
56.0	72.46		
57.0	70.71		
58.0	67.18		
59.0	65.66		
60.0	62.72		
61.0	60.19		
62.0	58.87		
63.0	56.16		
64.0	54.23		
65.0	53.39		
66.0	51.60		
67.0	49.99		
68.0	47.65		
69.0	47.05		
70.0	46.15		
71.0	45.28		
72.0	44.02		
73.0	43.08		
74.0	41.39		
75.0	39.09		
76.0	38.70		
77.0	35.99		
78.0	34.95		
79.0	34.00		

Displacement module [mm]
 Legend:
 01 January 2019 00:47 —●— 01 July 2018 00:55 —□— 01 January 2018 00:53 —◆— 01 July 2017 00:55 —■—
 01 January 2017 00:58 —*— 01 July 2016 00:27 —◇— 01 January 2016 00:54 —x—

DMS AKL004-120-0915: Polar diagram - Cumulative
Report N. KH-03-06 - Nedre Borehull 76mm - 01.01.2019 00:47

Contractor: NVE
 Site: Aknes Lower
 Project: 1 IMT + 2IUT100 + 117 IT
 Monitoring interval: 0-120 m bgl
 Installation date: 04.08.2015
 Calibration date: 18.09.2015 09:00
 Notes: Borehole depth = 197.30



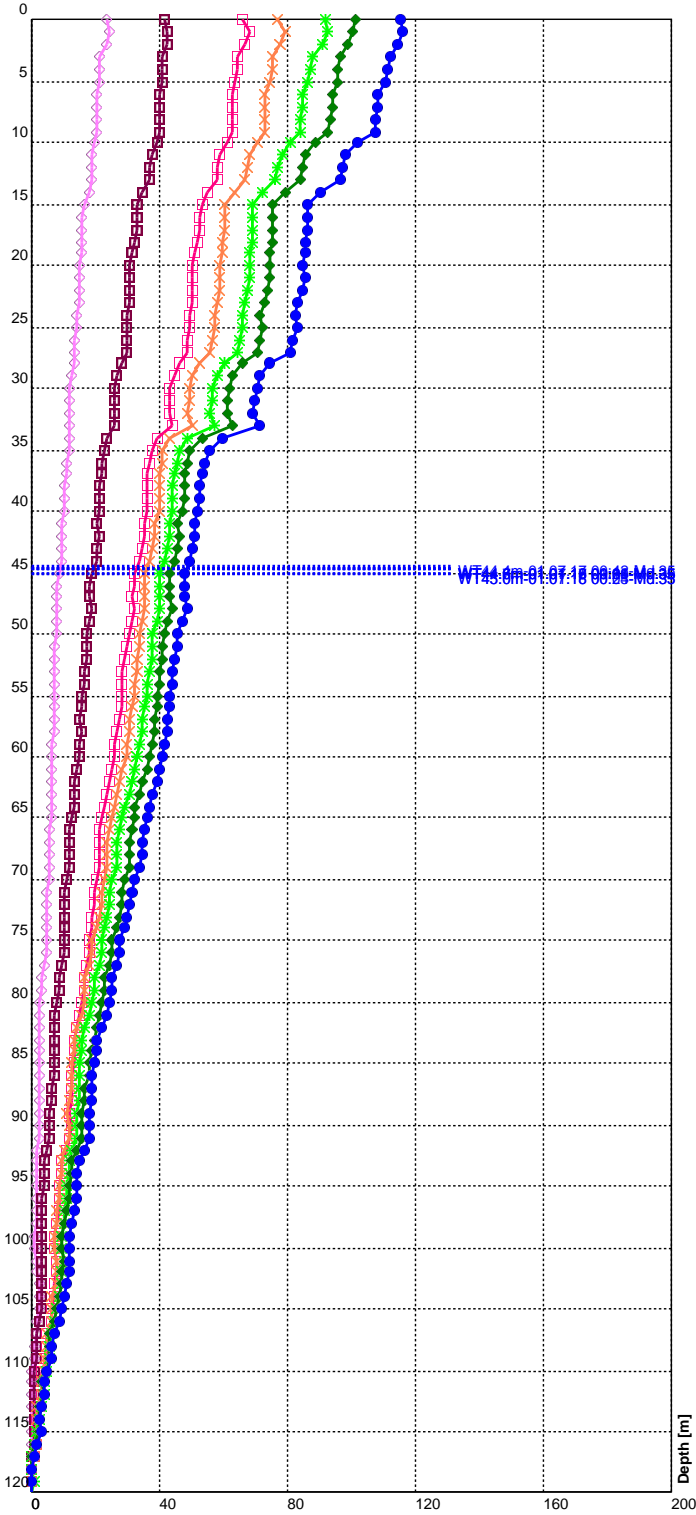
East [mm]	North [mm]	East [mm]	North [mm]
121.0	34.93	27.4	16.96
114.2	34.52	26.2	16.31
111.4	35.41	23.7	16.92
110.2	35.92	21.4	16.82
107.6	37.00	20.9	16.92
107.2	37.93	20.4	16.30
107.0	38.23	20.4	16.30
105.6	39.46	21.3	14.97
106.9	37.58	18.2	16.27
106.9	37.58	18.4	15.36
107.2	37.78	16.7	14.62
107.2	37.78	15.5	14.18
107.2	37.78	16.0	11.38
105.2	36.95	13.2	12.04
104.9	37.37	13.5	10.63
104.0	37.46	12.3	11.18
103.9	36.48	11.7	12.04
102.3	38.29	11.0	12.03
102.7	37.76	10.2	11.31
102.7	37.76	10.9	11.32
102.7	37.76	8.6	10.52
102.0	38.51	7.4	10.42
101.3	39.28	6.8	9.65
102.1	38.41	5.9	11.86
101.7	36.42	5.5	8.84
101.1	38.48	5.5	8.84
100.8	38.13	4.6	8.67
98.6	37.46	2.9	8.35
97.5	36.13	2.3	8.74
95.4	39.12	3.1	7.85
95.1	36.86	2.1	9.21
95.0	39.83	1.2	7.29
95.0	38.71	0.9	6.09
95.3	37.88	0.0	5.46
95.0	39.58	1.8	4.95
94.7	38.27	-0.9	4.19
94.1	37.88	-0.4	2.90
93.4	36.87	-0.2	2.42
92.7	35.84	0.0	0.27
92.1	36.85	1.3	1.67
89.5	37.56		
89.0	37.45		
87.2	36.73		
84.7	36.73		
82.5	34.83		
80.5	31.75		
80.9	30.71		
79.6	31.55		
80.0	29.88		
78.6	29.06		
76.0	30.05		
74.5	31.28		
72.4	32.51		
69.9	30.07		
67.8	30.69		
67.3	30.39		
65.4	31.29		
63.1	31.89		
59.0	32.17		
58.5	29.90		
55.3	29.67		
52.4	29.52		
51.1	29.17		
48.3	28.61		
46.4	28.01		
45.1	28.51		
44.3	26.39		
43.3	24.93		
40.2	25.60		
39.2	25.99		
37.1	27.39		
36.0	27.42		
35.8	25.66		
34.8	25.42		
34.1	23.43		
32.5	21.79		
30.8	23.38		
29.8	20.25		
28.6	20.09		
28.2	18.92		

Values are sorted by depth

Legend:
 01 January 2019 00:47 —●— 01 July 2018 00:55 —□— 01 January 2018 00:53 —◆— 01 July 2017 00:55 —■—
 01 January 2017 00:58 —*— 01 July 2016 00:27 —◇— 01 January 2016 00:54 —x—

DMS AKM006-120-0915: Module displacement - Cumulative
Report N. KH-02-06 Åknes Middle borehole - 01.01.2019 01:01

Contractor: NVE
 Site: Aknes Middle 2014
 Project: 1IMT+2IUT100+117IT
 Monitoring interval: 0-120 mbgl
 Installation date: 22.05.2014
 Calibration date: 20.09.2015 16:00
 Notes:

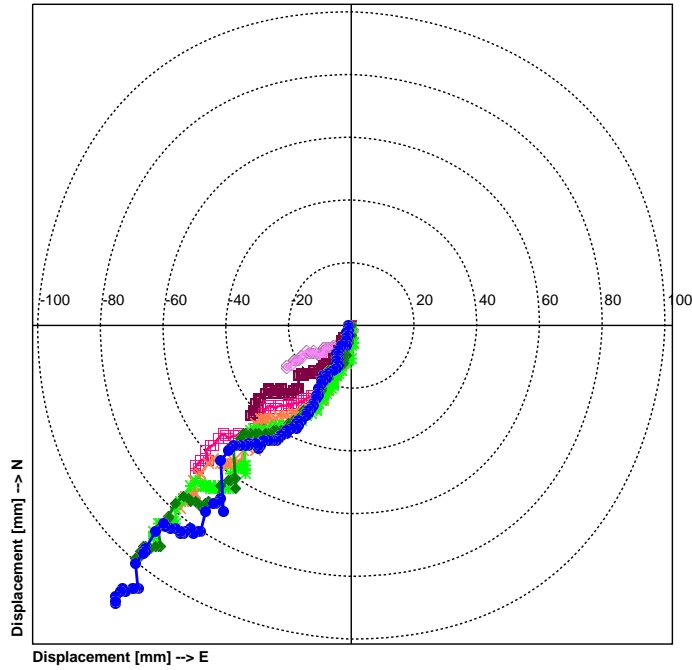


Depth [m]	Displ. [mm]	Depth [m]	Displ. [mm]
0.0	115.67	80.0	24.68
1.0	116.46	81.0	24.10
2.0	114.74	82.0	22.66
3.0	112.33	83.0	21.13
4.0	111.42	84.0	20.72
5.0	110.96	85.0	19.73
6.0	108.91	86.0	19.29
7.0	108.90	87.0	18.96
8.0	108.18	88.0	18.96
9.0	107.82	89.0	18.16
10.0	102.68	90.0	18.53
11.0	98.71	91.0	18.29
12.0	97.32	92.0	16.84
13.0	96.79	93.0	15.16
14.0	90.66	94.0	14.75
15.0	86.82	95.0	14.12
16.0	86.82	96.0	14.12
17.0	86.85	97.0	13.38
18.0	86.04	98.0	13.00
19.0	85.70	99.0	12.25
20.0	85.46	100.0	12.25
21.0	85.55	101.0	12.50
22.0	84.98	102.0	12.11
23.0	83.71	103.0	11.52
24.0	82.52	104.0	10.54
25.0	83.24	105.0	10.02
26.0	82.12	106.0	8.96
27.0	81.43	107.0	7.52
28.0	75.02	108.0	6.69
29.0	71.75	109.0	6.29
30.0	70.97	110.0	5.21
31.0	70.11	111.0	4.47
32.0	69.11	112.0	4.42
33.0	71.99	113.0	3.31
34.0	60.15	114.0	3.07
35.0	56.13	115.0	3.22
36.0	54.74	116.0	1.66
37.0	53.69	117.0	0.94
38.0	53.29	118.0	0.49
39.0	53.29	119.0	0.78
40.0	52.22		
41.0	51.22		
42.0	51.22		
43.0	50.32		
44.0	49.80		
45.0	48.36		
46.0	48.36		
47.0	48.25		
48.0	48.72		
49.0	47.63		
50.0	46.25		
51.0	45.49		
52.0	44.74		
53.0	44.52		
54.0	44.46		
55.0	43.77		
56.0	43.69		
57.0	42.93		
58.0	42.84		
59.0	42.03		
60.0	41.48		
61.0	40.17		
62.0	39.24		
63.0	38.12		
64.0	36.90		
65.0	36.40		
66.0	35.58		
67.0	34.65		
68.0	34.51		
69.0	34.30		
70.0	32.67		
71.0	31.66		
72.0	31.19		
73.0	30.41		
74.0	29.39		
75.0	28.14		
76.0	28.14		
77.0	27.05		
78.0	25.56		
79.0	25.25		

Displacement module [mm]
 Legend:
 01 January 2019 01:01 —●— 01 July 2018 00:05 —◆— 01 January 2018 00:05 —*— 01 July 2017 00:42 —x—
 01 January 2017 00:14 —□— 01 July 2016 00:24 —■— 01 January 2016 00:29 —◇—

DMS AKM006-120-0915: Polar diagram - Cumulative
Report N. KH-02-06 Åknes Middle borehole - 01.01.2019 01:01

Contractor: NVE
 Site: Aknes Middle 2014
 Project: 1IMT+2IUT100+117IT
 Monitoring interval: 0-120 mbgl
 Installation date: 22.05.2014
 Calibration date: 20.09.2015 16:00
 Notes:



East [mm]	North [mm]	East [mm]	North [mm]
-75.1	-87.97	-10.4	-22.38
-75.1	-88.99	-10.5	-21.69
-75.1	-86.71	-10.2	-20.23
-73.8	-84.64	-9.8	-18.73
-73.1	-84.13	-9.9	-18.22
-72.0	-84.43	-9.3	-17.38
-69.8	-83.63	-8.7	-17.24
-69.5	-83.85	-8.2	-17.11
-68.6	-83.62	-8.2	-17.11
-68.0	-83.66	-8.4	-16.10
-68.8	-76.18	-8.9	-16.25
-66.8	-72.69	-8.6	-16.16
-65.9	-71.61	-7.4	-15.13
-65.6	-71.21	-5.5	-14.13
-62.2	-65.97	-4.8	-13.93
-59.6	-63.14	-4.7	-13.33
-58.8	-63.85	-4.7	-13.33
-57.7	-64.92	-4.4	-12.65
-56.3	-65.03	-4.6	-12.17
-55.8	-65.02	-4.5	-11.39
-54.6	-65.75	-4.5	-11.39
-54.1	-66.26	-4.4	-11.71
-53.2	-66.22	-3.9	-11.47
-52.5	-65.21	-4.3	-10.69
-51.5	-64.48	-4.0	-9.74
-50.7	-66.05	-4.5	-8.98
-48.9	-65.95	-3.7	-8.15
-47.8	-65.92	-3.4	-6.70
-46.4	-58.94	-2.2	-6.32
-44.0	-56.70	-1.8	-6.03
-43.0	-56.48	-1.7	-4.92
-42.4	-55.86	-2.0	-4.01
-41.4	-55.34	-1.4	-4.20
-41.0	-59.15	-1.1	-3.11
-41.9	-43.13	-1.5	-2.70
-39.5	-39.91	-1.2	-2.97
-38.5	-38.89	-0.7	-1.51
-37.5	-38.37	-0.8	-0.41
-36.7	-38.68	-0.5	-0.03
-36.7	-38.68	-0.7	-0.28
-35.4	-38.34		
-33.5	-38.72		
-33.5	-38.72		
-32.7	-38.21		
-32.4	-37.78		
-30.2	-37.80		
-30.2	-37.80		
-29.4	-38.25		
-29.4	-38.87		
-28.6	-38.10		
-27.9	-36.86		
-26.6	-36.90		
-26.0	-36.42		
-24.9	-36.92		
-24.6	-37.06		
-24.3	-36.41		
-24.0	-36.53		
-23.4	-35.99		
-23.1	-36.10		
-22.4	-35.58		
-22.5	-34.82		
-21.0	-34.25		
-20.5	-33.48		
-19.0	-33.07		
-17.6	-32.44		
-17.0	-32.17		
-17.3	-31.10		
-16.9	-30.24		
-16.6	-30.28		
-16.0	-30.32		
-14.8	-29.14		
-14.2	-28.27		
-13.9	-27.92		
-13.5	-27.23		
-13.0	-26.34		
-12.4	-25.28		
-12.4	-25.28		
-11.7	-24.40		
-10.9	-23.13		
-10.9	-22.78		

Values are sorted by depth

Legend:

01 January 2019 01:01 —●— 01 July 2018 00:05 —◆— 01 January 2018 00:05 —✱— 01 July 2017 00:42 —✕—
 01 January 2017 00:14 —□— 01 July 2016 00:24 —■— 01 January 2016 00:29 —◇—

Laboratorieresultater

D.1 Materiale fra KH-01-17

Tabell D.1: Mål, vekt, tetthet og lyd hastighet for tørre og vannmettede prøver fra KH-01-17.

Mål KH-01-17			Tørr				Vannmettet			
Prøve	Lengde [mm]	Diameter [mm]	Masse [g]	Gangtid [s]	Lydhastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]	Masse [g]	Gangtid [s]	Lydhastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]
1	92,86	40,62	335,24	21,9	4240	2,79	336,07	18,4	5047	2,79
2	88,34	40,62	323,06	19,9	4439	2,82	324,04	17,5	5048	2,83
3	92,82	40,60	335,47	25,3	3669	2,79	337,05	20,7	4484	2,80
4	84,9	40,63	313,3	27,5	3087	2,85	314,57	20,2	4203	2,86
5	77,3	40,61	284,1	20,8	3716	2,84	285,27	17,4	4443	2,85
6	92,9	40,62	336,65	30,1	3086	2,80	338,12	22,3	4166	2,81
7	93,25	40,63	339,9	33,2	2809	2,81	341,5	23,7	3935	2,82
8	93,24	40,63	336,13	38,1	2447	2,78	338,8	29,1	3204	2,80
9	88,33	40,61	320,42	25,3	3491	2,80	321,77	19,4	4553	2,81
10	93,29	40,64	343,1	31,3	2981	2,83	344,08	19,4	4809	2,84
Gj.snitt					3397	2,81			4383	2,82

Tabell D.2: Bruddvinkel og kommentarer på bruddtype etter treaksialtest fra KH-01-17.

Serie	Kjerne nr.	Omslutnings- trykk [Mpa]	Bruddvinkel			Kommentar
			x	y	vinkel [°]	
1	1	0	40,97	82,02	27	Komplekst brudd. Delvis påvirket av foliasjon. Kombinert splitt og skjærbrudd. Lite tydelig.
	3	0	40,66	79,23	27	Skjærbrudd. Ikke brudd langs foliasjonen. Påvirket av foliasjonen men ikke dominerende, det betyr at vi har fått testet materialeegenskapene.
	6	0	40,62	43,18	43	Forvitret, oppkjust, siltig/leirig materiale i bruddsonen.
2	2	2,5	40,68	76,43	28	
	4	2,5	40,65	41,19	45	Leirig, skjærbruddet langs foliasjonen.
	7	2,5	40,66	33,32	51	Brudd langs foliasjonen
3	10	5	40,74	77,09	28	Skjærbrudd med trapper på grunn av foliasjonen. Ikke så leirig.
	9	5	40,63	65,61	32	
	8	5	40,66	52,08	38	Svak. Litt brattere enn foliasjonen. Leirig belegg.

Tabell D.3: Resultat fra tilttest KH-01-17

Prøve KH-01-17	Oppsett Kjerne øverst	Repetisjon	Tiltvinkel, β_i [°]	Basic friksjonsvinkel, ϕ_b [°](lign. (9.3))	Basic friksjonsvinkel, ϕ_b Median [°]
Serie 1, Prøve nr. 1 ,3, 6	1	1	33,9	30,2	31,9
		2	35,7	31,9	
		3	33,1	29,4	
		4	35,6	31,8	
		5	35,7	31,9	
	3	1	36,3	32,5	
		2	33,2	29,5	
		3	35,7	31,9	
		4	35,2	31,4	
		5	32,1	28,5	
	6	1	34,1	30,4	
		2	36,4	32,6	
		3	35,2	31,4	
		4	35,7	31,9	
		5	35,7	31,9	
Serie 1, Prøve nr. 7, 8, 10	7	1	36,4	32,6	
		2	39	35,0	
		3	36,7	32,8	
		4	38,7	34,8	
		5	36,8	32,9	
	8	1	35,7	31,9	
		2	36,1	32,3	
		3	35,7	31,9	
		4	35,1	31,3	
		5	34,1	30,4	
	10	1	38,6	34,7	
		2	37,6	33,7	
		3	34,9	31,1	
		4	36	32,2	
		5	37,3	33,4	
Serie 1, Prøve nr. 2, 4, 9	2	1	35,5	31,7	
		2	36,7	32,8	
		3	33,2	29,5	
		4	37,6	33,7	
		5	32,7	29,1	
	4	1	32,6	29,0	
		2	33,7	30,0	
		3	34,4	30,7	
		4	32,9	29,3	
		5	36,8	32,9	
	9	1	40	36,0	
		2	37,7	33,8	
		3	41,8	37,8	
		4	39,4	35,4	
		5	38,4	34,5	

D.2 Materiale fra KH-02-17

Tabell D.4: Mål, vekt, tetthet og lydshastighet for tørre og vannmettede prøver fra KH-02-17.

Mål KH-01-17			Tørr				Vannmettet			
Prøve	Lengde [mm]	Diameter [mm]	Masse [g]	Gangtid [s]	Lydshastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]	Masse [g]	Gangtid [s]	Lydshastighet [m/s]	Tetthet [g/cm ³]
2.1	102,86	40,61	376,99	20,5	5018	2,83	377,64	18,9	5442	2,83
2.2	102,83	40,61	373,58	20,4	5041	2,80	374,15	18,9	5441	2,81
3	102,824	40,61	374,15	21	4896	2,81	374,73	18,9	5440	2,81
4	102,84	40,61	367,21	22,9	4491	2,76	368,09	19,5	5274	2,76
5	94,02	40,55	336,48	21,4	4393	2,77	337,1	18,3	5138	2,78
6.1	102,67	40,63	370,18	21,8	4710	2,78	370,74	18,9	5432	2,78
6.2	102,65	40,62	371,05	24,6	4173	2,79	371,8	19,9	5158	2,79
Gj.snitt					4812	2,80			5379	2,80

Tabell D.5: Resultat fra tilttest fra KH-02-17

Prøve KH-01-17	Oppsett Kjerne øverst	Repetisjon	Tiltvinkel, β_i [°]	Basic friksjonsvinkel, ϕ_b [°](lign. (9.3))	Basic friksjonsvinkel, ϕ_b Median [°]
Serie 1, Prøve nr. 2.1, 2.2 og 3	2.1	1	34,9	31,1	30,9
		2	32,9	29,3	
		3	34,1	30,4	
		4	34	30,3	
		5	33,6	29,9	
	2.2	1	34,6	30,9	
		2	38,8	34,8	
		3	34,5	30,8	
		4	32,9	29,3	
		5	35,3	31,5	
	3	1	36,9	33,0	
		2	36,1	32,3	
		3	37,3	33,4	
		4	35,1	31,3	
		5	36,3	32,5	
Serie 2, Prøve nr. 4,5,6.1	4	1	39,8	35,8	
		2	36,6	32,7	
		3	34,8	31,0	
		4	33,5	29,8	
		5	34,1	30,4	
	5	1	34,5	30,8	
		2	31,4	27,9	
		3	34,9	31,1	
		4	35,5	31,7	
		5	34,1	30,4	
	6.1	1	35,7	31,9	
		2	31,4	27,9	
		3	35,1	31,3	
		4	34,5	30,8	
		5	32,9	29,3	

D.3 XRD

Inneholder:

Borehull KH-01-17

- Prøve nr. 1, 2 og 10 (190279: Sterk)
- Prøve nr. 3, 4, 6, 7, og 9 (190280: Middels)
- Prøve nr. 8 (190281: Svak)
- Prøve nr. 8 (Svellende mineraler)

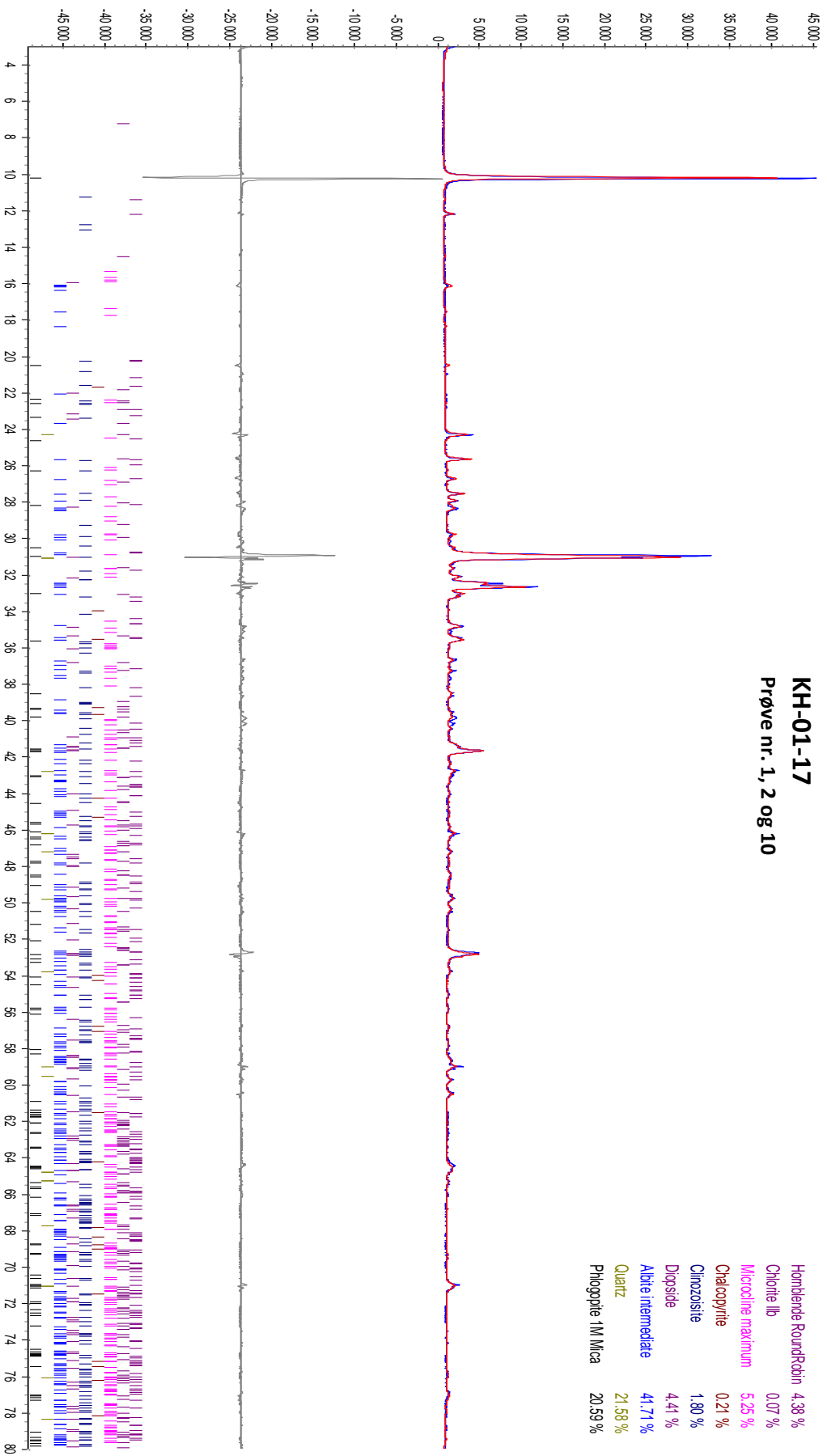
Borehull KH-02-17

- Bulk prøve av alle kjerner (190282: Prøve 4)

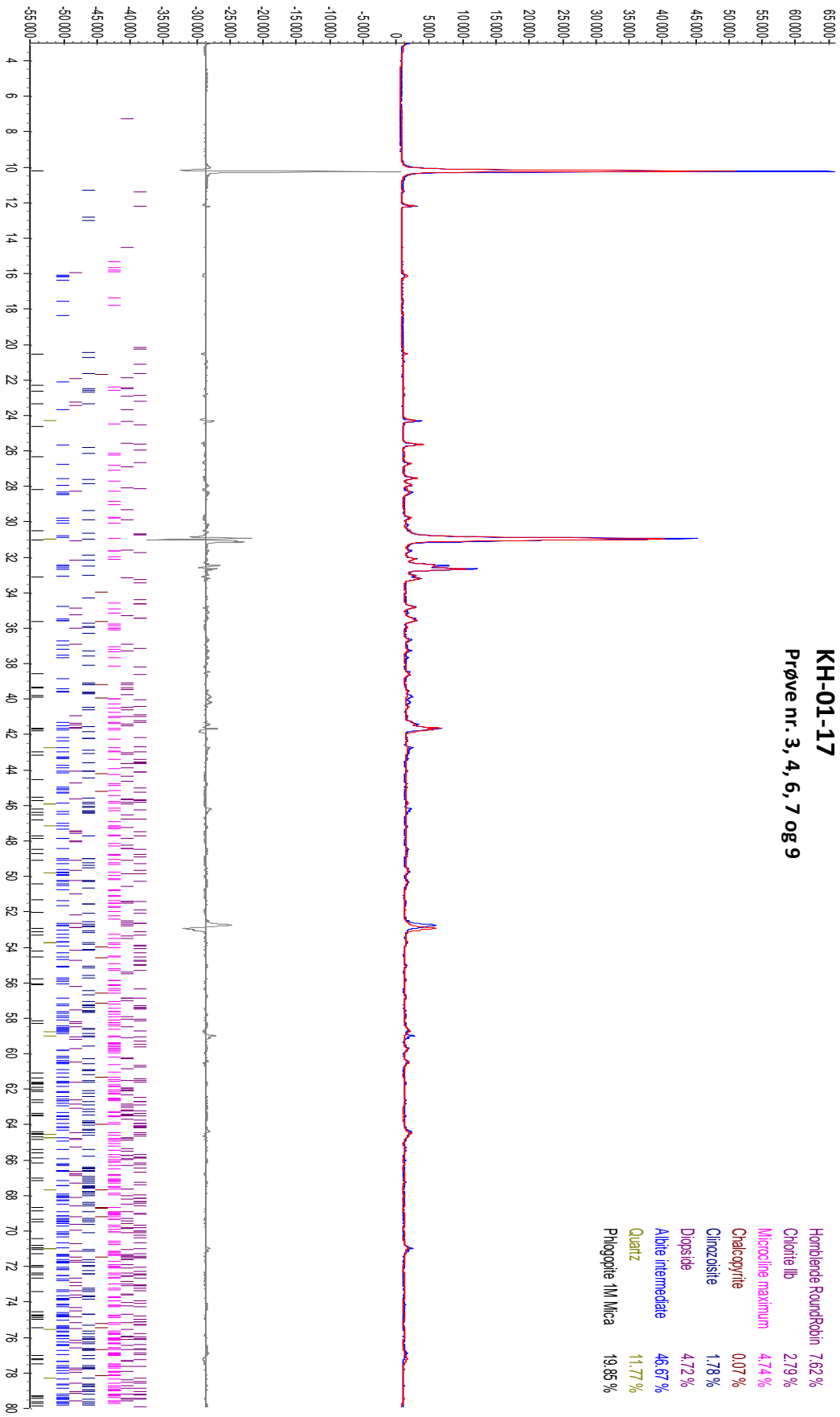
190279: Stærk

KH-01-17

Prøve nr. 1, 2 og 10

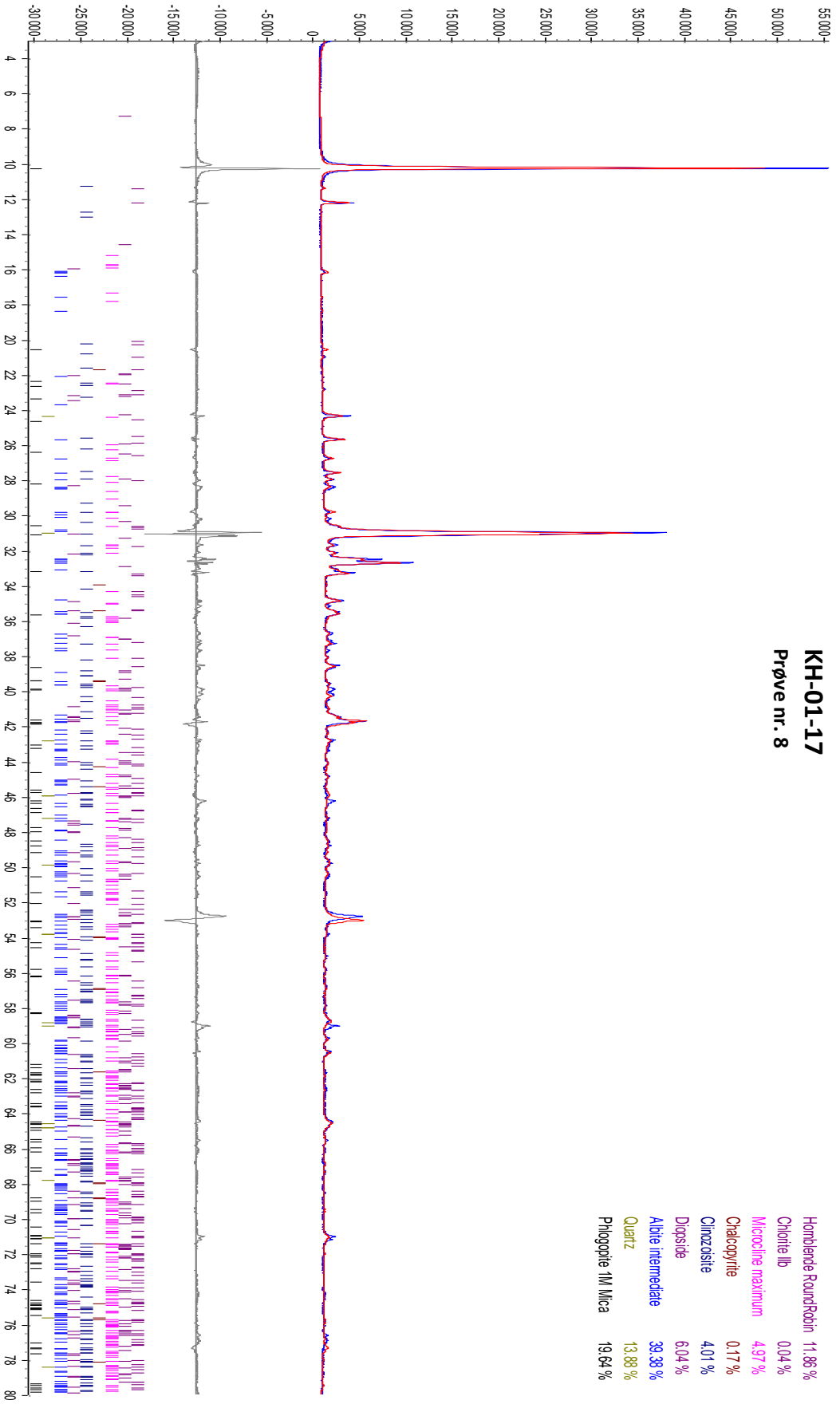


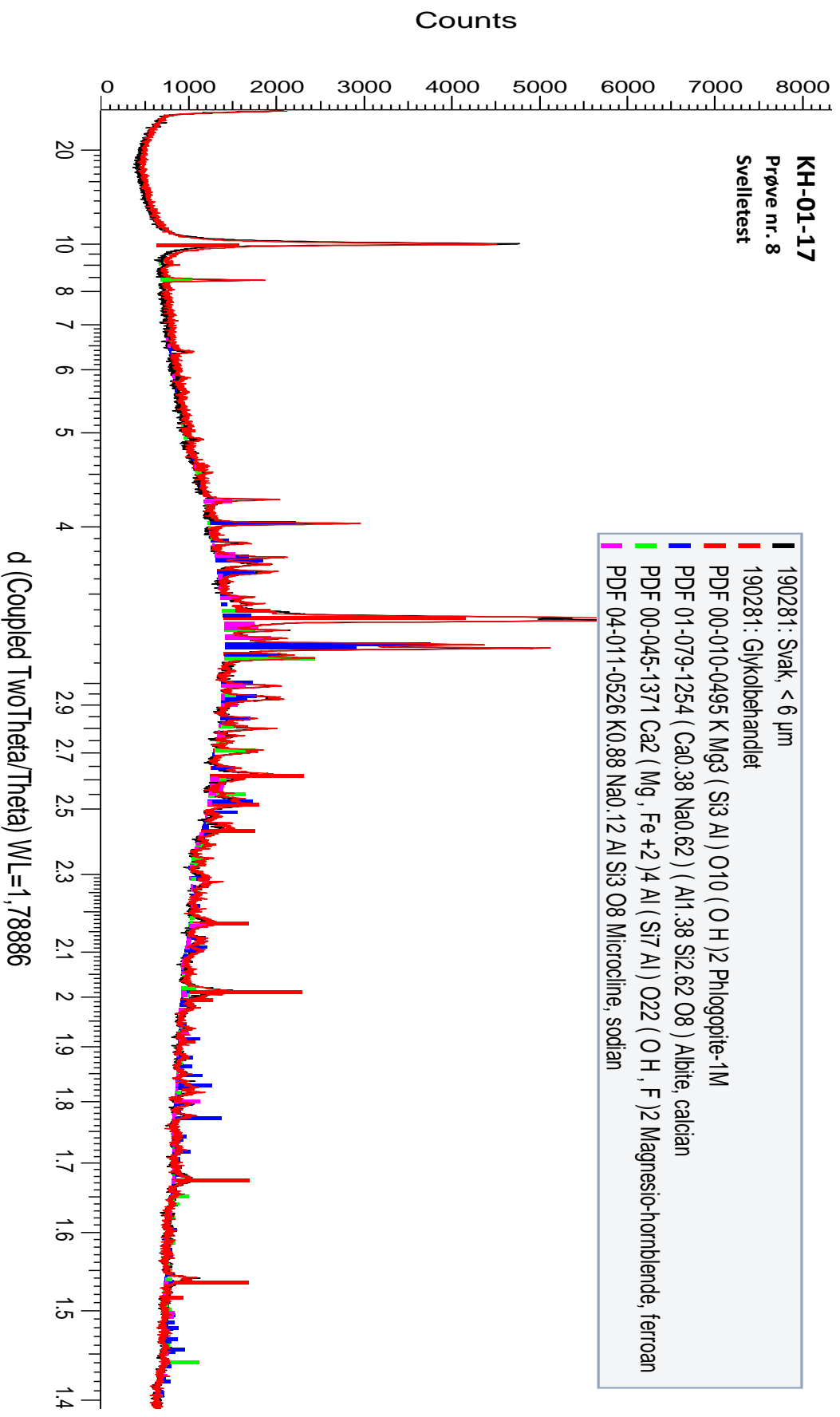
190280: Middels
KH-01-17
Prøve nr. 3, 4, 6, 7 og 9



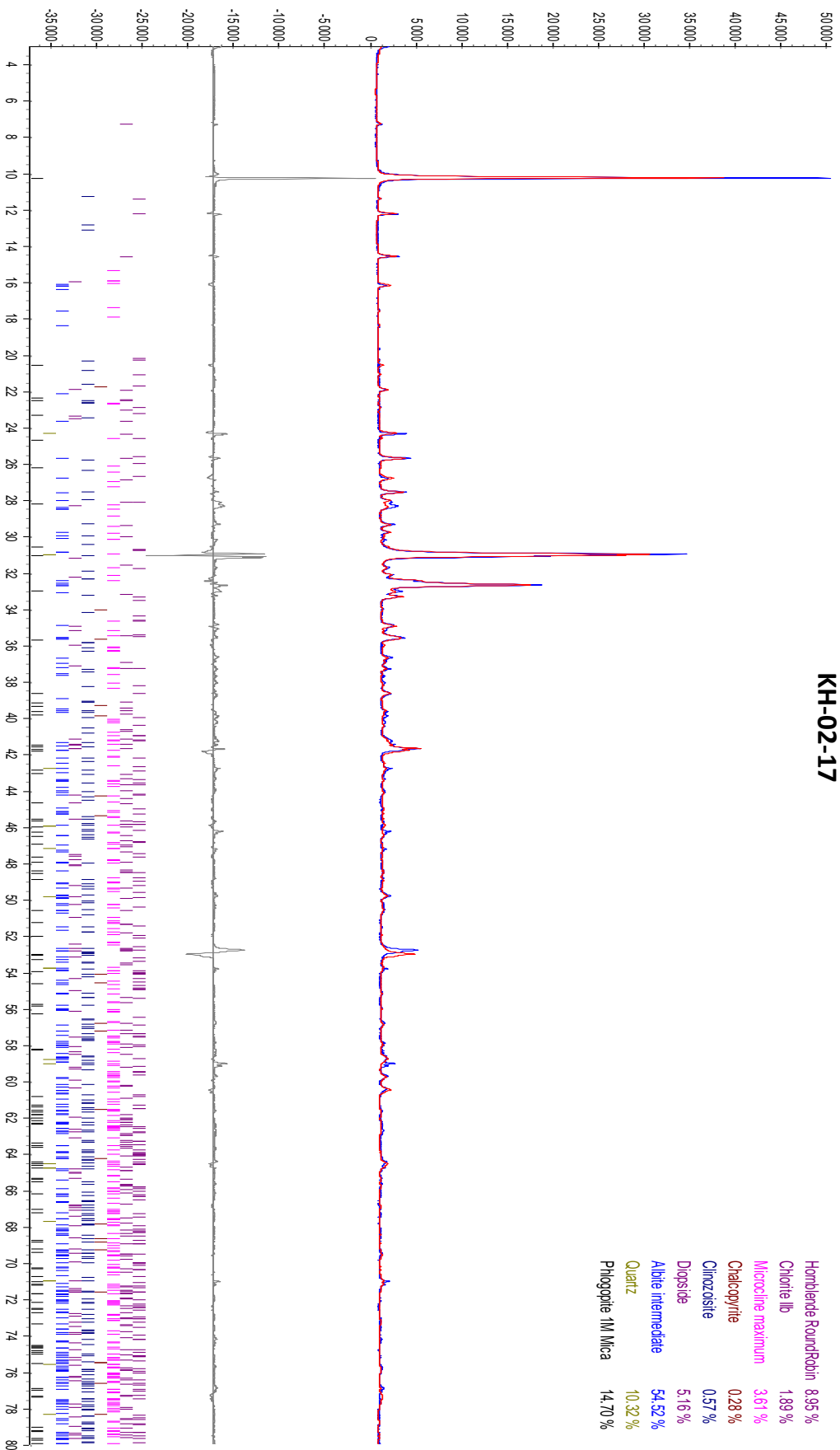
190281: Svak
KH-01-17
Prøve nr. 8

Hornblende Reinholdin	11.86 %
Chlorite lb	0.04 %
Muscovite maximum	4.97 %
Chalcopyrite	0.17 %
Clinzoisite	4.01 %
Dioptase	6.04 %
Albite triemedate	39.38 %
Quartz	13.88 %
Phlogopite 1M Mica	19.64 %





190282: Prøve 4
KH-02-17



Hornblende/RoundRobin	8.95 %
Chlorite lb	1.89 %
Microcline maximum	3.61 %
Chalcopyrite	0.28 %
Clinzoisite	0.57 %
Dioptside	5.16 %
Albite intermediate	54.52 %
Quartz	10.32 %
Phlogopite 1M Mica	14.70 %

