

Undersøkelser av  
sprengningsskadesonen for vurdering av  
hydraulisk konduktivitet i bergmassen  
rundt sprengte tunneler

--

**Malene Tveit**

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Karl Gunnar Holter, IGP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geovitenskap og petroleum







## MASTEROPPGAVE

### Prosjektbeskrivelse

**Kandidatens navn:** Malene Tveit

**Oppgavens tittel:** **Undersøkelser av sprengningsskadesonen for vurdering av hydraulisk  
konduktivitet i bergmassen rundt sprengte tunneler**

**English title:** Investigations of the excavation damaged zone for evaluation of the hydraulic conductivity in the rock mass which surrounds drill-and-blast excavated tunnels

**Utfyllende tekst:**

1. På grunnlag av feltundersøkelser i form av kjerneboringer og in-situ vanntrykksmålinger og laboratorieundersøkelser av bergmateriale skal det gjøres en vurdering av den hydrauliske konduktiviteten av bergmassen rundt sprengte bergrom. Det skal spesielt undersøkes i hvilken grad sprenging kan forventes å gi en øket hydraulisk konduktivitet i bergmassen nær tunnelkonturen. Funnene av undersøkelsen skal diskuteres i lys av aktuelle tekniske løsninger for tunnelkledninger i norske jernbanetunneler.
2. Oppgaven utføres i samarbeid med Bane NOR teknisk avdeling infrastruktur med Førsteamanuensis II Karl Gunnar Holter som koordinator

**Studieretning:** Ingeniør- og miljøgeologi  
**Hovedprofil:** Ingeniørgeologi og bergmekanikk  
**Tidsrom:** 15.1.2018-11.6.2018

Karl Gunnar Holter, Førsteamanuensis II/hovedveileder

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN  
NTNU, 20.1.2018 / rev. 25.5.2018



## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for geovitenskap og petroleum, ved Norges naturtekniske universitet våren 2018. Masteroppgaven er skrevet som siste ledd i utdannelsen tekniske geofag ved studieretning ingeniør- og miljøgeologi med ingeniørgeologi og bergmekanikk som hovedprofil. Oppgaven er en videreførelse av prosjektoppgaven skrevet høsten 2017 som fungerte som et forstudie.

Masteroppgaven er gjennomført i samarbeid med Bane NOR.

Ved NTNU har Førsteamanuensis II Karl Gunnar Holter vært veileder. Oppgavens tittel og oppgaveteksten er definert av Karl Gunnar Holter, hvor undertegnede har vært med i prosessen.

Jeg vil rette en stor takk til Karl Gunnar for hjelp underveis, både i høst under arbeidet med prosjektoppgave og feltarbeid til masteroppgaven, og i vår under arbeidet med masteren. Har alltid vært interessante samtaler og du sitter med mye kunnskap jeg er glad for at jeg har fått gleden av. Takk for gode innspill!

Vil takke Gunnar Vistnes for god hjelp og veiledning under laboratoriumsarbeidet. Vil også rette en takk til Kevin John Tuttle, og Allan George Krill og Mai Britt E. Mørk for hjelp med bergartsbestemmelse

Til slutt vil jeg takke Bane NOR og Skanska Strabag for god mottakelse og for hjelpen jeg fikk ved anlegget til nye Ulriken. Vil også takke for den gode mottakelsen jeg fikk på Bane NOR Marienborg.

Trondheim, 11.06.2018  
Malene Tveit



## Sammendrag

I denne masteroppgaven har målet vært å se på oppsprekkingssonen som oppstår i umiddelbar nærhet til tunnelkonturen ved konvensjonelt drevne tunneler og hvilke hydrauliske egenskaper denne sonen har. Bakgrunnen for å se på de hydrauliske egenskapene sprengningsskadesonen (EDZ) gir, er for å se hva denne sonen har å si for drenering for jernbanetunneler.

Den hydrauliske konduktiviteten av bergmassen rundt sprengte bergrom vurderes blant annet på grunnlag av feltundersøkelser i form av kjerneboringer og in-situ vanntrykksmålinger på anleggsområdet til det nye tunnellopet gjennom Ulriken i Bergen. Tunnellopet ble drevet konvensjonelt og ved bruk av TBM.

Ved å sammenligne berget i umiddelbar nærhet av bergoverflaten for tunnellop drevet ved sprengning og tunnellop drevet ved TBM, ses det på om det finnes en sammenheng mellom type driving og omfanget av den hydrauliske konduktiviteten.

Transmissiviteten blir estimert på grunnlag av hydrauliske målinger i borhullene. Resultatene de hydrauliske målingene gir blir sammenlignet med sprekkkartleggingen fra borkjerneloggingen for å gi et bedre bilde av den hydrogeologiske situasjonen.

Laboratoriumstestene som blir utført i masteroppgaven er UCS-tester og lyd hastighetsmålinger. Testene utføres for å se om det er en forskjell i styrken for sprengningsskadesonen i forhold til styrken i det mer intakte berget. E-modul blir sett på for å kartlegge om mikroriss fra sprengningsskadesonen kan påvises.

Laboratoriumstestene og feltundersøkelsene har påvist sprengningsskadesonen og dens konduktive egenskap. Undersøkelsene har vist at transmissiviteten er større i sprengningsskadesonen enn i tunnelkonturen til TBM-drevet tunnel. Sprengningsskadesonen er også påvist ved borkjernelogging. Verdiene for E-modul har ikke gitt noe grunnlag for å si noe om mikroriss. Lydhastigheten har vist en svak trend til å minke i sprengningsskadesonen. Ut fra teori og undersøkelser gjort i masteroppgaven gir det grunnlag for å si at sprengningsskadesonen har en gunstig egenskap for tunnelkledninger med tanke på vanntrykksavlastning.



## Abstract

The goal for this master thesis is to investigate the fractured zone that occurs in immediate rock mass by drill-and-blast excavated tunnels and the hydraulic properties of this zone. The background for looking at the hydraulic properties that the excavation damaged zone (EDZ) provides is to see the influence this zone has to drainage of rail tunnels.

The hydraulic conductivity of the rock mass surrounding drill-and-blast excavated tunnels is considered, on field surveys of rock core drilling and in-situ water pressure measurements in the area of the new tunnel through Ulriken in Bergen. The tunnel was excavated by drill-and-blast and by use of a TBM.

By comparing the conditions of the immediate rock mass between drill-and-blast excavated tunnels and tunnel by TBM, it is shown whether there is a connection between the type of excavation and the extent of hydraulic conductivity.

Transmissivity is estimated based on hydraulic measurements in the boreholes. The results given by the hydraulic measurements are compared to the characterizing of the fractures in core sampling to show the hydrogeological situation.

The laboratory tests used in the master's thesis are UCS-tests and P-wave velocity tests. The tests are performed in order to see if there is a difference in the strength of the excavation damaged zone compared to the strength of the intact rock. Young's modulus is used to determine if micro fractures from the blast damage zone can be detected.

Data from laboratory tests and from the field survey detect the excavation damaged zone and its conductive property. The studies have shown that the transmissivity has a higher value in the excavation damaged zone compared to the immediate rock mass excavated by use of a TBM. The excavation damaged zone is also detected by core sampling. The values for Young's modulus does not create any micro fractures. The P-wave velocity test have shown a slight trend to decrease in the excavation damaged zone. Based on the theory and research done in this master's thesis, it provides the basis for saying that the excavation damaged zone has a favorable effect on tunnel linings in regards to water pressure relief.



## Ordforklaring

### **Hydraulisk konduktivitet(K):**

Proporsjonalitetskonstant som relaterer vannstrømningsrate gjennom et medium til gradienten. Kalles også hydraulisk ledningsevne og avhenger av både vannets og mediets egenskaper. I en viss skala kan man betrakte et hydraulisk homogen tredimensjonal bergblokk som et ekvivalent kontinuum med den hydrauliske konduktiviteten.

### **Transmissivitet(T):**

I virkeligheten er bergets sprekker i hovedsak todimensjonalt og stort sett plane strukturer. Transmissiviteten er en proporsjonalitetskonstant som angir vannets strømningshastighet gjennom én enhets bredde. Hydraulisk konduktivitet brukes mest for en helhet, mens transmissivitet brukes mer i ingeniørgeologien for sprekker.

### **Excavation disturbed Zone(EdZ)**

Sprenningsforstyrret sone er en sone med hydromekanisk og geokjemisk endringer, uten store endringer i strømning og transportegenskaper.

### **Excavation Damaged Zone(EDZ)**

Sprenningsskadetzone er en sone med hydromekanisk og geokjemisk endringer som induserer betydelige endringer i strømnings- og transportegenskaper. Disse forandringene kan for eksempel inkludere økning i permeabilitet.

**Seksjon-** Måleområde for hydrauliske målinger. Området mellom to packere eller området mellom packer og enden av borhullet.

**Observasjonsområde:** Området i borhullet bakom innerste packer.

**Packer:** Utstyr brukt til hydrauliske målinger som avgrensner måleområdet.

**Mansjett-** Utstyr brukt til hydrauliske målinger, består av en eller to packere.

## Innhold

.....	ii
<b>Forord</b> .....	<b>iii</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Ordforklaring</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. Innledning</b> .....	<b>1</b>
1.1. Bakgrunn for oppgaven .....	1
1.2. Formål og omfang .....	1
1.3. Avgrensninger .....	1
<b>2. Viktige momenter fra prosjektoppgaven</b> .....	<b>3</b>
2.1. Oppsprekking rundt bergrom .....	3
2.2. Drivemetoders betydning for skadesonen .....	4
2.3. Sprengningsskadesonen og dens påvirkning av konduktiviteten .....	4
<b>3. Tunnelkledninger med tanke på vannsikring</b> .....	<b>7</b>
3.1. Tankegang med drenering .....	7
3.2. Tunnelkledninger brukt for jernbane og deres vanntettingsmetode .....	9
3.2.1. Frittstående konstruksjoner. Frittstående drenasjehvelv av betongelementer med eller uten termisk isolasjon og Frittstående drenasje- og isolasjonshvelv av PE-skum med brannbeskyttende sprøytebetong .....	10
3.2.2. Plasstøpt betonghvelv med foliemembran og drenerende filtduk .....	12
3.2.3. Permanent sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytebar membran .....	14
3.2.4. Oppsummering av løsninger for tunnelkledning i jernbanetunneler .....	16
3.3. Fremtidige utredninger .....	17
3.4. Tester gjort for målinger av vanntrykk mot tunnelkledning .....	18
<b>4. Hydrogeologi</b> .....	<b>19</b>
4.1. Sprekkes karakter .....	19
4.2. Grunnvannsstrømning i oppsprukket berg .....	20
4.3. Estimering av bergmassens egenskap til gjennomstrømning .....	24
4.4. Testmetoder for målinger av strømning i berg .....	24
4.5. Beregning av transmissivitet ved injeksjonstest .....	25
4.5.1. Moyes formel .....	25
4.5.2. Mansjettmålingsformel .....	26
4.5.3. Gustafsons formel .....	27
<b>5. Feltarbeid på anleggsområdet til nye Ulriken tunnel</b> .....	<b>28</b>
5.1. Anleggsområdet .....	28
5.2. Regionalgeologi .....	29
5.3. Kjerneuttak på Arna-siden .....	30
5.3.1. Sprekkesett for Arna-siden .....	31
5.4. Kjerneuttak på Fløen-siden .....	32
5.4.1. Sprekkesett for Fløen-siden .....	32
<b>6. Borkjerne logging</b> .....	<b>34</b>
6.1. RQD-verdi og sprekkavstand .....	34



6.2. JRC.....	36
6.3. Borkjernelogging for Arna-siden .....	37
6.4. Borkjernelogging for Fløen-siden.....	39
<b>7. Hydrauliske målinger i Ulriken .....</b>	<b>41</b>
7.1. Utstyret.....	41
7.2. Målte parametere .....	44
7.3. Fremgangsmåte .....	45
7.4. Bestemmelse av formasjonstrykk og injeksjonstrykk.....	45
7.4.1. Antatt formasjonstrykk og injeksjonstrykk.....	45
7.4.2. Egentlig formasjonstrykk og injeksjonstrykk.....	46
7.5. Feilkilder .....	47
<b>8. Resultater av hydrauliske målinger .....</b>	<b>47</b>
8.1. Hydrauliske målinger for borhull 9 .....	47
8.2. Hydrauliske målinger for borhull 11.....	51
8.3. Hydrauliske målinger for borhull 12.....	53
8.4. Hydrauliske målinger for borhull 13.....	55
8.5. Hydrauliske målinger for borhull 18.....	57
8.6. Hydrauliske målinger for borhull 21.....	61
8.7. Hydrauliske målinger for borhull 22.....	67
8.8. Hydrauliske målinger for borhull 23.....	72
8.9. Beregning av transmissivitet og sprekkebredde .....	77
<b>9. Laboratorieundersøkelser .....</b>	<b>79</b>
9.1. Preparering av prøver.....	79
9.2. Tetthet.....	84
9.3. Lydhastighetstest.....	85
9.4. UCS-test og måling av E-modul.....	86
9.5. Diskusjon av labresultater: .....	90
<b>10. Samlet diskusjon av resultater fra felt og laboratorium .....</b>	<b>91</b>
10.1 Arna-siden.....	91
10.2. Fløen-siden .....	93
<b>11. Konklusjon.....</b>	<b>94</b>
<b>12. Referanser.....</b>	<b>96</b>
<b>13.Vedlegg.....</b>	<b>99</b>

# 1. Innledning

## 1.1. Bakgrunn for oppgaven

I dag finnes det flere forskjellige tunnelkledningsdesign for veg- og jernbanetunneler. Løsningene er konstruert for å sikre mot ras fra tunnelkontur og sikre mot innlekkasje av vann. Valg av løsning som brukes er avhengig av bruk av tunnel og de geologiske forholdene. De forskjellige tunnelloesningene har forskjellig løsning med tanke på drenering. For jernbanetunneler er det teknisk levetid som gjelder. De største kostnadene ved tunnelbygging er knyttet til vann- og frostsikringskonstruksjonene. For å redusere bruk av sprøytebetong og øke levetiden til tunnelkledninger er det gunstig å se på hva sprengningsskadesonen i umiddelbar nærhet av tunnelkonturen har å si for dreneringsdesign av tunnelkledning.

I prosjektoppgaven ble det sett på sprengningsskadesonen og dens påvirkning for lagring av atomavfall. I masteroppgaven settes sprengningsskadesonen i sammenheng med konduktivitet og drenerende egenskap. Sprengningsskadesonen som oppstår i umiddelbar nærhet av bergoverflaten skal ses på og hva denne sonen har å si for tunnelkledninger, med tanke på trykkavlastning. I oppgaven blir forskjellige tunnelkledninger brukt for jernbane fremstilt og deres dreneringsløsning blir forklart.

## 1.2. Formål og omfang

Hovedformålet for oppgaven er å vurdere den hydrauliske konduktiviteten av bergmassen i umiddelbar nærhet til tunnelkonturen ved konvensjonelt drevne tunneler og hvilke hydrauliske egenskaper denne sonen har. For å vurdere den hydrauliske konduktiviteten av bergmassen rundt sprengt bergrom er det lagt mye vekt på sammenligning av bergmassen i sprengt tunnellop mot bergmasse i TBM drevet tunnellop. For å vurdere den hydrauliske konduktiviteten i sprengningsskadesonen (EDZ) er det brukt blant annet beregninger av transmissivitet ut fra in-situ vanntrykksmålinger. Borkjerner er logget med tanke på sprekkekarakter, bergmassekvalitet og spekkeavstand. Borkjerneloggingen kombineres med verdiene for transmissivitet for å gi et bedre inntrykk av den hydrauliske egenskapen til EDZ. Verdier for E-modul blir funnet for borkjerner for å påvise mikroriss induisert av sprengning. Kjerner blir også testet for lydshastighet, for å sammenligne styrkeforholdet i borkjernene.

## 1.3. Avgrensninger

I denne oppgaven ble det tatt store mengder prøver fra Arna og Fløen. Prøvene ble transportert fra Bergen til Trondheim og kan ha blitt påvirket av frakten. Det ble tatt bilde før og etter transporten og kjernene er ikke påvirket visuelt, men styrken for borkjernen kan ha blitt påvirket.

Noen av kjernene som ble testet for enaksial trykkfasthet var kortere enn standarden for forholdet mellom lengde og diameter. Prøvene har også en stor forskjell i geologi, noe som ga testene begrenset grunnlag for drøfting.

Ved in-situ vanntrykksmålinger var ikke utstyret egnet for de forholdene som var på Arnasiden. Sprøytebetongen var på opptil 150cm og utstyret ble ikke brukt på en optimal måte.

Eksempler på dette er at packerne burde ha en avstand på minimum 10cm til sprøytebetongen. Det samme gjelder forholdene. Borhull som kunne være gunstige for hydrauliske målinger ble valgt bort grunnet ujevnt underlag, slik at utstyret ikke kunne bli plassert der.

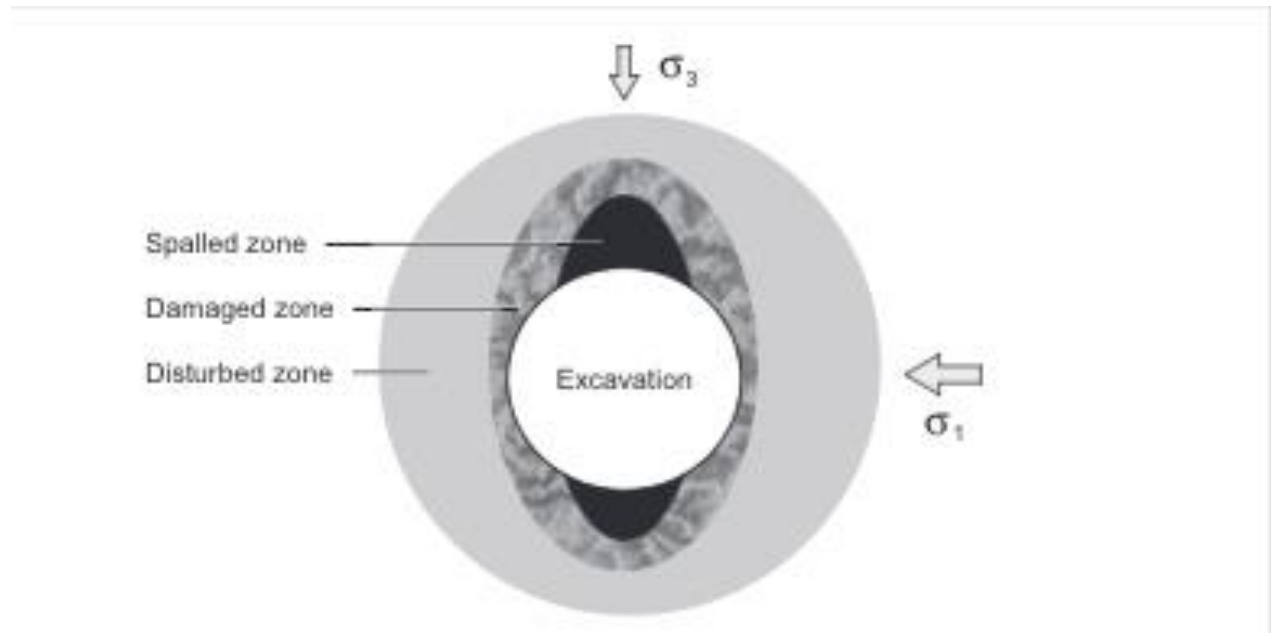
Ved kjerneuttak ble det brukt forskjellige borhoder på kjerneuttaksutstyret. Dette gir forskjellige verdier på diameterne. Ved kjerneuttakene ble borkjernene flere ganger brukket av manuelt. Om det var oppsprukket berg i kjernen kunne disse bli enda mer oppløst grunnet rotasjon i utstyret ved kjerneuttak. Ved borkjernelogging var det noen ganger vanskelig å skille naturlig sprekk og brudd forårsaket av kjerneuttak.

Vanskelig å velge kjerner som skulle testes i laboratoriet fra sprengningsskadesonen, da kjernene ofte ikke var lange nok til laboratoriet.

## 2. Viktige momenter fra prosjektoppgaven

Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven «*Ingeniørgeologiske, bergmekaniske og hydrogeologiske forhold av betydning for endelig deponering av kjernefysisk avfall i bergrom.*» Formålet med prosjektoppgaven var å få kjennskap til sprengningsskadesonen (EDZ) og den sprengningsforstyrrede sonen (EdZ). I prosjektoppgaven ble EDZ og EdZ forklart og diskutert i sammenheng med lagring av atomavfall i bergrom. Under er de viktigste momentene fra prosjektoppgaven med tanke på masteroppgaven tatt med.

### 2.1. Oppsprekking rundt bergrom



**Figur 1: EDZ, EdZ og sone med spalting for sirkulær åpning med høyeste spenning i horisontal retning og laveste spenning i vertikal retning. (Etter Bäckblom, 2008)**

Dannelse av en sprengningsforstyrret sone (EdZ) og en sprengningsskadesone (EDZ) forventes rundt alle unaturlige åpninger i geologiske formasjoner. Dette medfører makro og mikrooppsprekninger, og det oppstår en endring i strukturen til berget. Endringen i strukturen resulterer i en økning av bergmassens hydrauliske konduktivitet, hovedsakelig gjennom bruddene og sprekkene fremkalt av sprengning eller boring. (Tsang mfl., 2005)

Figur 1 viser en mulig framstilling av EDZ og EdZ for et sirkulært bergrom. I tillegg er det markert en sone for spalting. Spaltingen forekommer i området med lavest hovedspenning, det vil si der tangentialspenningen er størst.

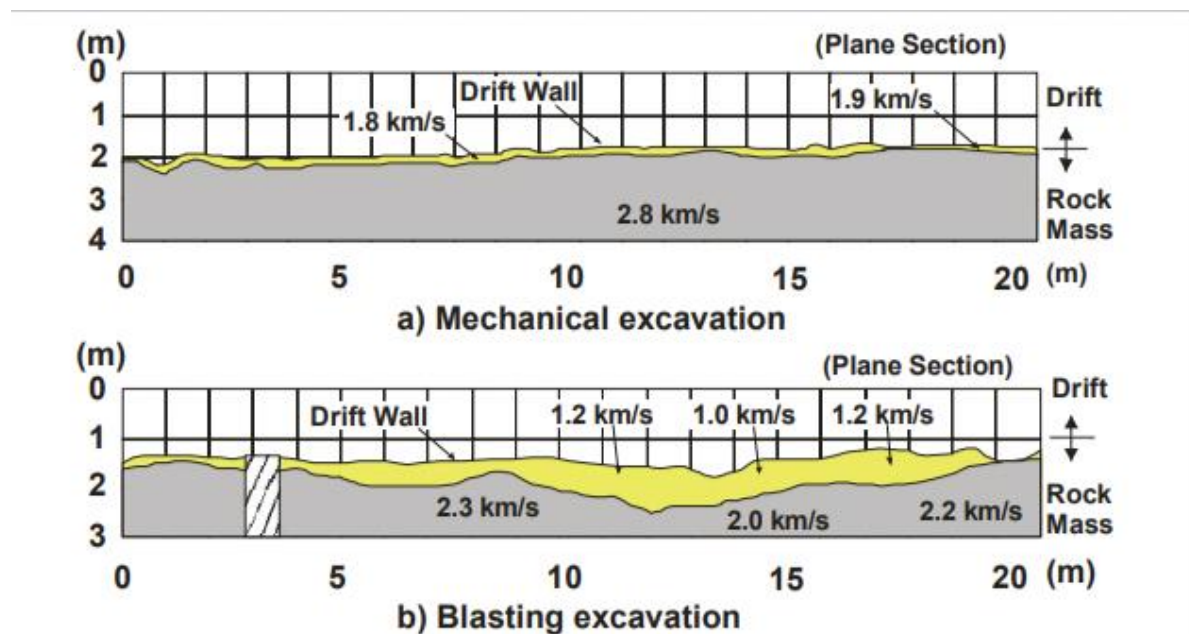
## 2.2. Drivemetoders betydning for skadesonen

EdZ og EDZ blir påvirket av drivingsmetoden. Under drivingen kan det i utgangspunktet være tre kilder til skade:

- selve utgravningsmetoden
- spenningsfordelingen rundt åpningen
- effekten av trykket som oppstår ved bruk av sikring under driving

For harde og sprø krystallinske bergarter kan utgravningsaktiviteten i seg selv forårsake betydelig skade, avhengig av utgravningsmetoden som benyttes. (Tsang mfl., 2005) Drivingsmetodene som er diskutert i prosjektoppgaven som er relevant for masteroppgaven er de vanligste drivingsmetodene for tunnel som er konvensjonell driving og bruk av TBM.

Figur 2 viser forskjellen i EDZ ut ifra driving. Lavere P-bølgehastighet tilsvarer mer skadet berg. Ser at skadesonen er større ved sprengning enn ved mekanisk driving. EDZ ligger innenfor 0,3 m i tunnelveggene og tunneltaket og opp til 0,8 m i tunnelgulvet ved konvensjonell driving. For TBM-tunnelen var skaden innenfor 0,03 m i dette eksempelet. (Backblom, 2008)



Figur 2: Forskjellen i hastighetsmålinger (P-bølger) i berget ut ifra a) boring og b) konvensjonell driving (Etter Sato mfl., 1999)

## 2.3. Sprengningsskadesonen og dens påvirkning av konduktiviteten

Krystallinsk berg inneholder et nettverk av naturlig forekommende sprekker, slik at dens permeabilitet før utgravning er ca.  $10^{-17} \text{ m}^2$ . Den estimerte økningen i permeabiliteten for EDZ i krystallinsk stein ved konvensjonell driving er én til tre størrelsesordener, noe som betyr at det krystallinske bergets EDZ ville ha en permeabilitet på  $10^{-14}$  til  $10^{-16} \text{ m}^2$ . Hvis en tunnelboremaskin brukes, kan EDZ være ca. 1 cm tykk, med en økning i permeabilitet med én størrelsesorden til  $10^{-16} \text{ m}^2$ . (Tsang m.fl, 2005)

Oppsprekking induisert av både sprengning og spenninger vil dannes nesten parallelt til tunnelkonturen. Omfanget til oppsprekkingen, og kobling sprekkene har til hverandre kan bare utforskes ved indirekte metoder, for eksempel hydraulisk testing i borehull eller bruk av geofysiske metoder(GPR) i tillegg til geologisk kartlegging. (SKB, 2015) I masteroppgaven er det brukt geologisk kartlegging og hydraulisk testing.

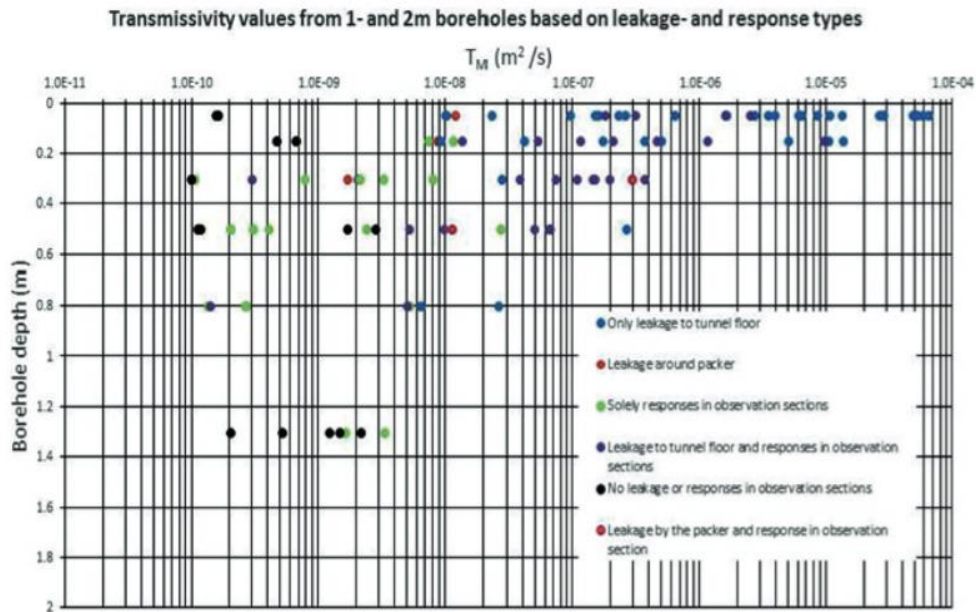
Sprengning gir en høyere hydraulisk konduktivitet og vannstrømning i bergmassen enn det boring gir, se Tabell 1. Tabellen viser også at forskjellen av EDZ skapt av spenninger ikke er forskjellig etter om det er sprengt eller brukt boring ved å anta at testene fra Stripa forskningsområde er korrekte. Ser dette ved å sammenligne den hydrauliske konduktiviteten og vannstrømningen for spenningsindusert EDZ for både sprengning og boring. (Pusch, mfl., 2015)

**Tabell 1: Omtrentlig aksial vannstrømning for sprengt og TBM-boret KBS-3Htunnel ved Stripa. Situasjonen for sprengt bergrom er markert med rødt, mens situasjonen for boret bergrom er markert med blått. (Pusch m.fl, 2015)**

Case	Approximate permeated cross section, m <sup>2</sup>	Hydraulic conductivity, m/s	Approximate water flow, m <sup>3</sup> /s
Virgin rock	25	E-11	3E-12
Blasted tunnel	22		8E-10
* Blast-EDZ	6	E-8	6E-10
* Stress-EDZ	16	E-9	2E-10
TBM-bored tunnel	22		2E-10
* Boring-EDZ	0.04	E-10	4E-14
* Stress-EDZ	16	E-9	2E-10

Det ble gjort flere observasjoner av Svensk Kärnbränslehantering (SKB) (2015) under undersøkelse av EDZ i krystallinsk berg. En av observasjonene var at oppsprekkingssoner induisert av sprengning er hovedkilden til de høye transmissivitetverdiene til berget. Tykkelsen til EDZ er på 40-50 cm. Forbindelsen mellom induserte fraksjoner er imidlertid begrenset. [SEP]

En annen observasjon var at oppsprekking som oppstod av sprengning i noen borkjerner ikke var åpne. Dette indikerer at det kan være småskala «rock bridges» i EDZ, skapt av sprengning. Ved høye verdier for transmissivitet er det lettest å bruke GPR (Ground Penetrating Radar). Det vil si for situasjoner med transmissivitet over  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/ s. (SKB, 2015) [SEP]



**Figur 3: Estimert transmissivitet for borehull mot borehullsdybde(SKB, 2015)**

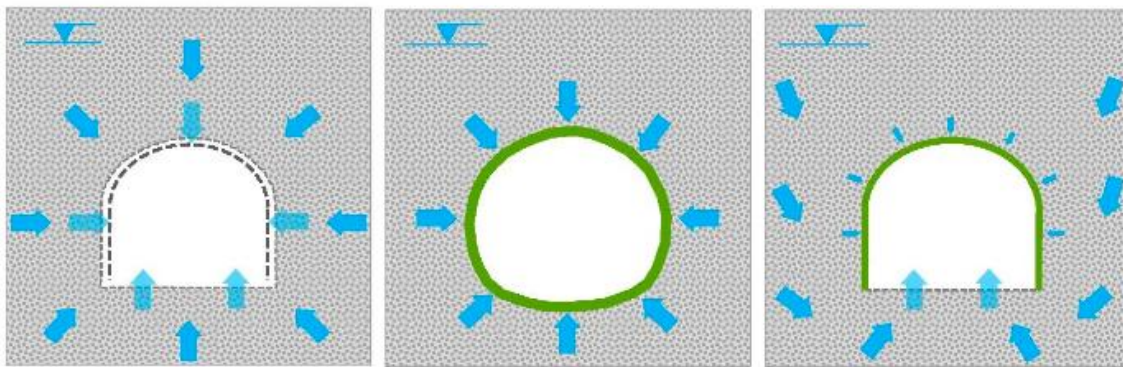
Ved Aspö Hard Rock Laboratory (2015) ble det gjort undersøkelser for å undersøke transmissiviteten i berget i en sprengningsskadesone. Dataene som ble funnet fra alle injeksjonstestene i enkelthullene ble brukt for å analysere korrelasjonsstrukturen for transmissive forhold i bergmassen. Figur 3 viser at flertallet av borehullene med en transmissivitet over  $10^{-8} m^2/s$  lekker til tunnelbunnen. Disse strømningsveiene tolkes for å ha oppstått grunnet sprengningsskadesonen. De mest transmissive områdene ligger i tunnelsålen, hvor det er forventet at de fleste skader oppstår. Den aksiale tilkoblingen er ikke kontinuerlig, men utviser en periodisk oppførsel. Det er en sammenheng mellom bunnladningsområdene og de høye verdiene. (SKB, 2015)

### 3. Tunnelkledninger med tanke på vannsikring

#### 3.1. Tankegang med drenering

Rennende vann og drypp er ikke ønskelig i tunneler og kan forårsake skader på konstruksjoner. Sikringen er avhengig av bruksområdet til tunnelen, f.eks. om det er en vegtunnel eller jernbanetunnel. Det økonomiske aspektet spiller også inn. Ved å velge en vannsikringskledning fremfor en annen, kan mye penger spares. I noen tilfeller, med lite innlekkasje, kan det holde med punktsikring I andre tilfeller kan det være nødvendig med gjennomgående vannsikring i hele tunnelen. (Jernbaneverket, 2015)

Det har blitt utført ulike typer løsninger for å håndtere vann- og frostproblematikk i tunneler. Å forinjisere berget for null innlekkasje er ikke realistisk i dag, med tanke på økonomi og teknisk utførelse. Internasjonalt jobbes det for å utarbeide metoder, materialer og teknikker for å kunne injisere tunneler så tette at tunnelkledninger ikke konstrueres for vanntetting. (Jernbaneverket, 2015)



**Figur 4:Konseptmodeller for vanntrykkspåkjenning. Til venstre: Vannsikring med drenasjehvelv, evt. drenert utstøpning. Tilnærmet drenert sprøytebetongoverflate. I midten: Heldekkende vannrett kledning. Udrenert konstruksjon. Fullt hydrostatisk vanntrykk. Til høyre: Delvis drenert tunnel med udrenert tunnelkledning i heng og veggene, og drenert såle. (Holter, 2015b)**

Figur 4 viser forskjellige hydrostatiske situasjoner etter dreneringsmetoden som brukes ved forskjellige tunnelkledninger. Med drenerende effekt menes vanntrykkavlastende effekt.

Udrenert situasjon i heng og vegger i en tunnel vil gi en grunnvannsstrøm mot tunnelsålen. Dette kan føre til et høyere grunnvannstykke i den omkringliggende bergmassen og tunnelkledningen, i forhold til i en situasjon med drenerende tunnelkledning. (Holter, 2015b)

Ved helt tette tunneler, udrenert, med heldekkende kledninger er den indre kledningen dimensjonert for å kunne ta opp maksimalt teoretisk vanntrykk. I Europa er det lang erfaring med denne typen konstruksjon. (Jernbaneverket, 2015) Follobanen bygges som en udrenert konstruksjon med vannrette betongelementer i hele tunneltversnittet. (Bane NOR, 2015)

Konsekvenser av oppbygging av høyt vanntrykk inn mot vannsikringsløsninger i direktekontakt med bergsikringen kan være store. Teoretisk høyeste vanntrykk  $\Delta p$ [Pa] er basert på avstanden fra grunnvannsspeilet til tunnelheng  $\Delta h$  [m] . Se Ligning 1:

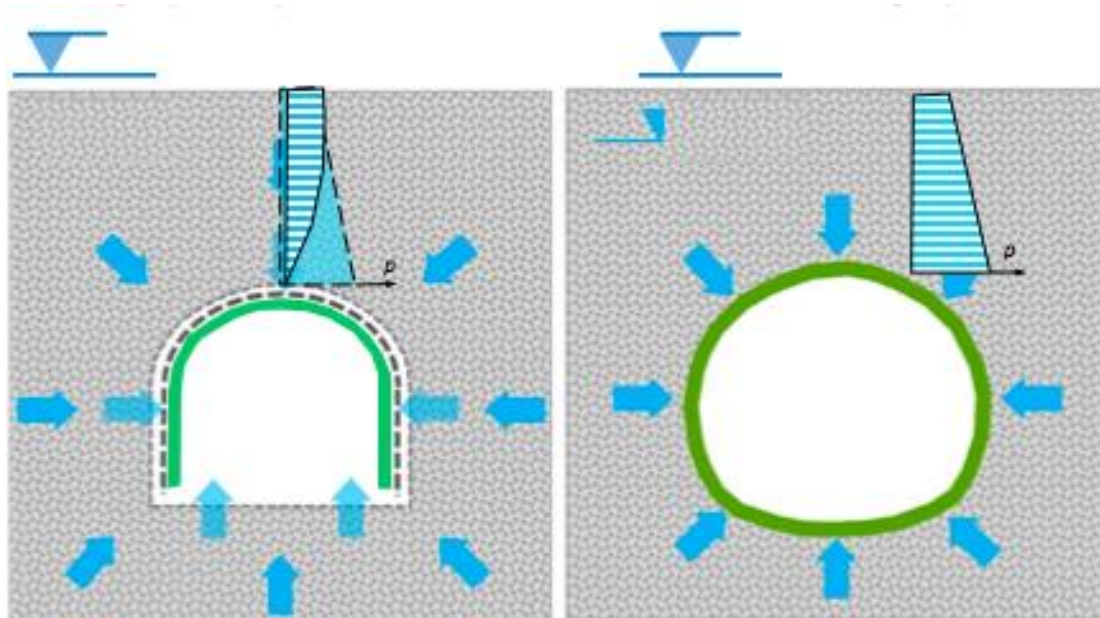
$$\Delta p = \rho g \Delta h$$

Ligning 1



der  $\rho$  står for vannets densitet [ $\text{kg/m}^3$ ] og  $g$  står for jordakselerasjonen [ $\text{m/s}^2$ ].

Figur 5 viser fremstilling av teoretisk høyeste vanntrykk og en senkning av vanntrykket ved oppsprukket, drenerende sone. Ved en membrantett tunneloverflate med åpen såle går vannet gjennom naturlige og spenningsinduserte sprekker i bergoverflaten til sålen med drenerende installasjon. (Jernbaneverket, 2015)



**Figur 5: Grunnvannstrykk for drenert og udrenert tunnelkontur. Venstre: Fullstendig drenert vannsikring, paraply prinsipp. Senkning av vanntrykk. Høyre: Udrenert vannsikring i hele tunnelkonturen. Full hydrostatisk trykk. (Holter, 2017b)**

### 3.2. Tunnelkledninger brukt for jernbane og deres vanntettingsmetode

Levetid for jernbanetunneler er på 100 år, mens det varierer for vegtunneler etter ÅDT (Årsdøgntrafikk). 50 år for <4000 ÅDT og 100år for >4000 ÅDT. Mye av grunnen til den kortere levetiden for vegtunneler er moderniseringen i vegtrafikken. Kjøretøyene kan endre seg mye i fremtiden. Det er forskjellige krav til tunnelkledninger for jernbane- og vegtunneler. En av forskjellene er kravet til estetikken. Estetikk av innvendig kledning er ikke like viktig for jernbane i forhold til vegtunnel, grunnet brukervennligheten for sjåfører. Ved konstruksjon av vegtunneler er det også krav om sikkerhet med tanke på kollisjonsscenarier. Det er nøye vurdert maksimum tillatt stengetid i hvert enkelt tilfelle for jernbanetunneler, siden omkjøringsmuligheter normalt ikke er tilgjengelig. (Holter, 2017a)

I Norge har man tradisjonelt tatt hensyn til bergmassens selvbærende evne ved fastlegging av sikringsbehov, og vurdert vannsikringsløsningen uavhengig av bergsikringskonstruksjonen. (Jernbaneverket, 2015)

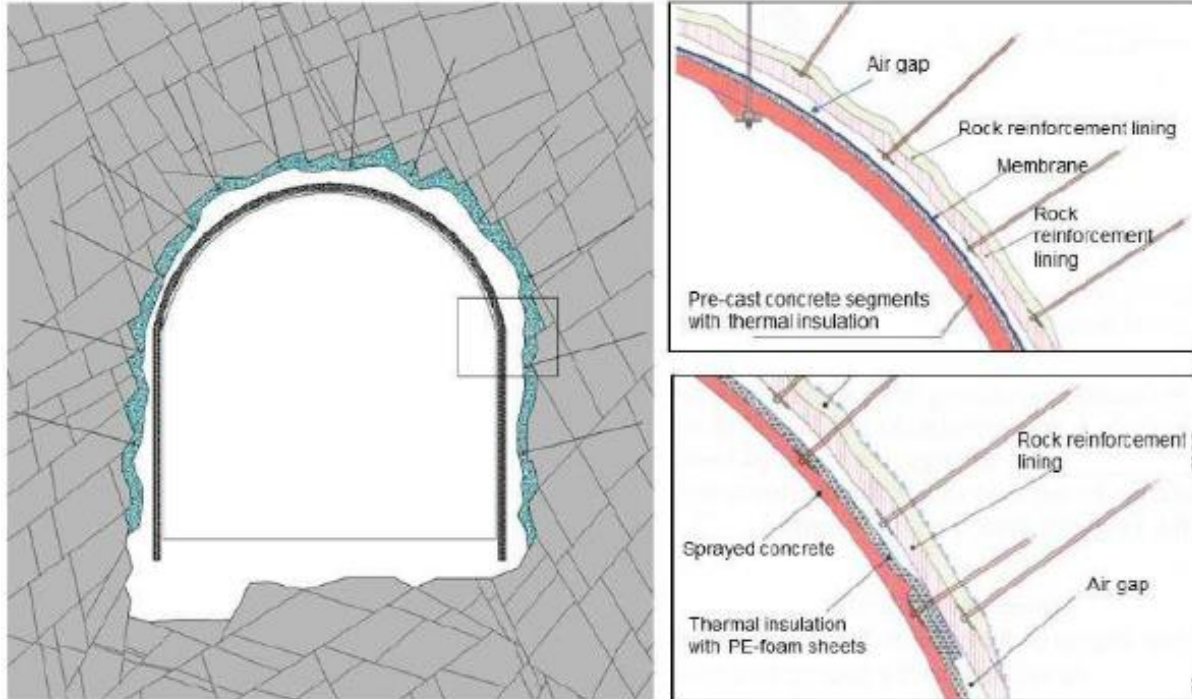
I delkapitlene under er det beskrevet fire konstruksjonstyper som per 2015 ble brukt av Bane NOR ved konvensjonelt drevne tunneler. (Jernbaneverkets Teknisk regelverk, 2015)

De vanligste metodene for vannsikring kan deles i to hovedgrupper. Det er frittstående konstruksjoner og konstruksjoner i direktekontakt med bergsikringen. Frittstående konstruksjoner er hvelv av betongelementer og hvelv av PE-skum. Konstruksjoner innenfor den andre hovedgruppen er kontaktstøpt betonghvelv med membran og permanent sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran. (Jernbaneverket, 2015)

Kravene for konstruksjonstyper for vann- og frostsikring har blitt endret i Endringsartikkel 1312 . (Bane NOR-Teknisk regelverk, 2016) I endringsartikkelen ble det vedtatt at for nye jernbanetunneler bør sikring mot innlekkasje av vann basere seg på følgende prinsipp:

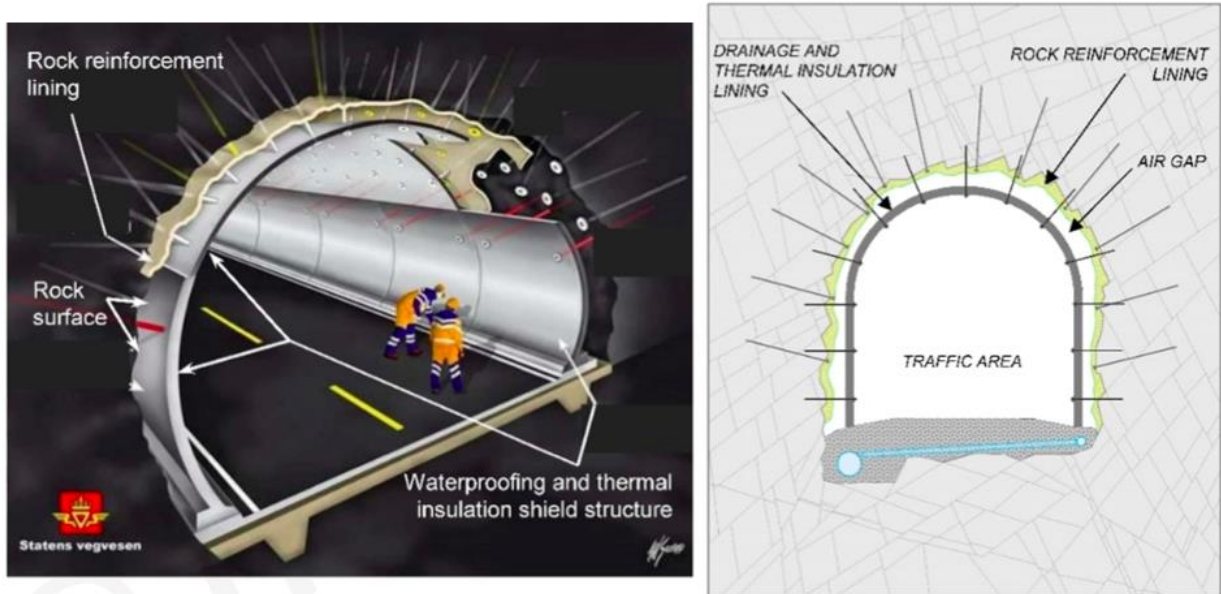
”Det velges en vannsikringsløsning som kan monteres i direktekontakt med bergsikringen. Dette betyr at hvelvløsninger som PE-skum og betongelementhvelv tas bort fra listen over aktuelle konstruksjonstyper. Det må da evt. søkes dispensasjon for å benytte disse løsningene.”

### 3.2.1. Frittstående konstruksjoner. Frittstående drenasjehvelv av betongelementer med eller uten termisk isolasjon og Frittstående drenasje- og isolasjonshvelv av PE-skum med brannbeskyttende sprøytebetong



Figur 6: Frittstående konstruksjon. Bildet øverst: Frittstående drenasjehvelv av betongelementer med eller uten termisk isolasjon Bildet nederst: Frittstående drenasje- og isolasjonshvelv av PE-skum med brannbeskyttende sprøytebetong (Holter mfl., 2013-hentet fra NPRA 2012)

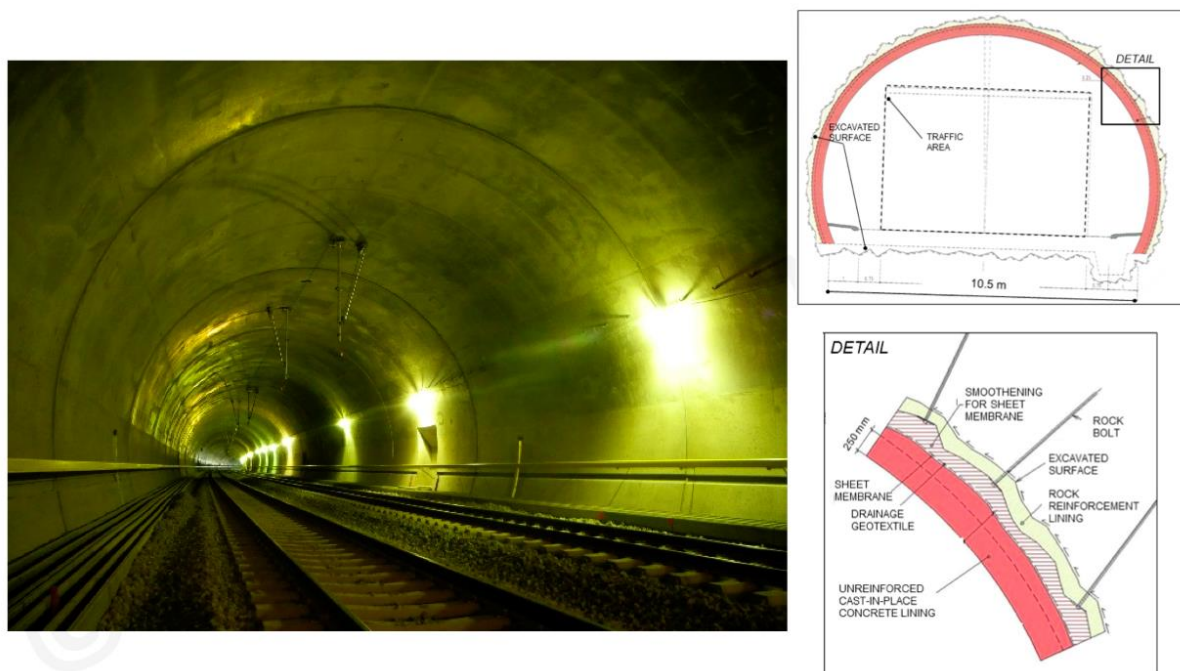
Figur 6 viser hvelvkonstruksjoner uten direkte kontakt med bergsikringen. Konstruksjonene inngår ikke dimensjoneringsmessig i bergsikringen. (Jernbaneverket, 2015) For å bruke en frittstående konstruksjon for planlagte jernbanetunneler må det søkes om disposisjon. Ulriken-tunnelen utformes med frittstående hvelv.



**Figur 7: Tradisjonell tunnelkonstruksjon for vegtunneler i Skandinaviske land. (Holter, 2017b)**

Frittstående hvelv er vanlige tunnelkledningsmetoder for vegtunneler i Skandinavia med harde bergarter, se Figur 7. Bergsikringen er utformet med sprøytebetong og bolter for å gi stabilitet til bergmassen. Utformingen av denne foringen utføres i henhold til Q-systemet (Barton mfl., 1974). En viktig funksjon er at bergsikringen ikke er vanntett, slik at en har en drenert struktur. (Holter mfl., 2013)

### 3.2.2. Plasstøpt betonghvelv med foliemembran og drenerende filtduk



Figur 8: Plasstøpt betonghvelv med foliemembran og drenerende filtduk. (Holter, 2017b)

Denne konstruksjonstypen, se Figur 8, er velprøvd og veletablert. Det er stor erfaring med spesifisering og konstruksjon av løsningen. Løsningen er mye brukt i Mellom-Europa. (Holter, 2017b)

Løsningen er i direkte kontakt med berget. Innerst mot bergoverflaten er det bergsikring i form av bolter og sprøytebetong. Montert på bergsikringen er det en membran med bakenforliggende filtduk. Se Figur 9 for illustrasjon av montering. Deretter etableres et kontinuerlig kontaktstøp. Løsningen er ikke isolert. (Jernbaneverket, 2015)



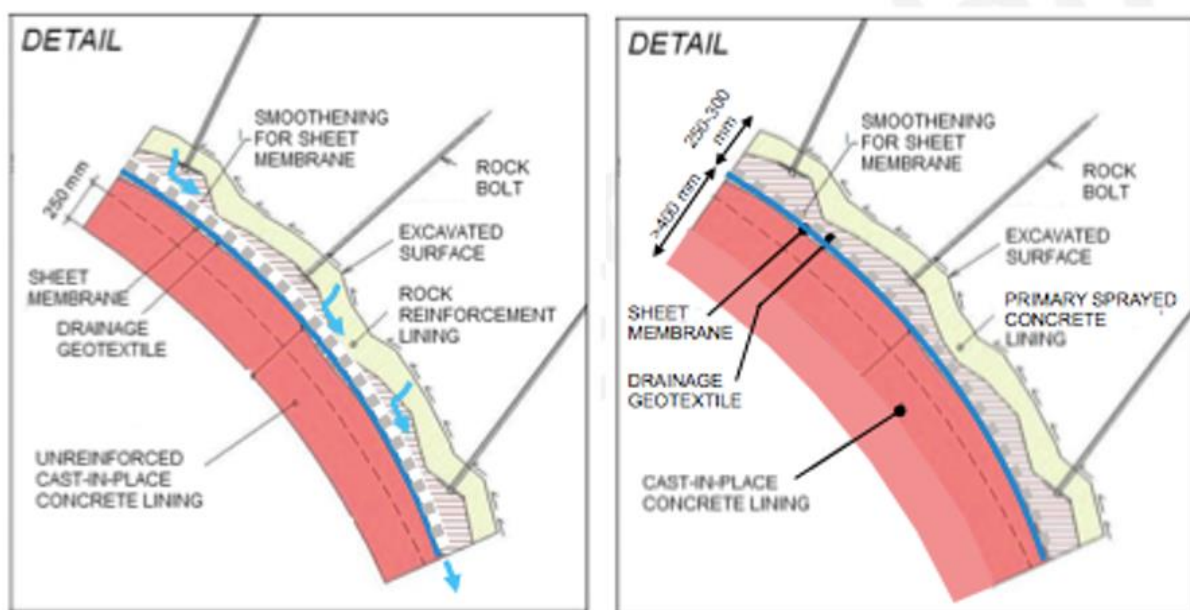
Figur 9: Installasjon av foliemembran og drenerende filtduk i Ulvintunnelen(jernbanetunnel).(Holter, 2017b)



Konstruksjonen fremstår som en robust løsning hvor det inngår få komponenter som kan feile. Løsningen krever lite vedlikehold i systemets levetid. Det er ikke mulig å utføre vedlikehold på membran eller dreingssjikt i ferdig konstruksjon, derfor må eventuelle feil og svakheter i konstruksjonen avdekkes under monteringen. (Jernbaneverket, 2015)

Bergsikringen med sprøytebetong må utføres med stor nøyaktighet for å redusere faren for skader og utettheter i membranen. En god kontur etter drivingen vil minske innholdet av «groper» som må utjevnes med sprøytebetong. Dette vil minske betongforbruket, i tillegg til å redusere faren for skader og utettheter i membranen. (Jernbaneverket, 2015)

Løsningen involverer forholdsvis store utstysressurser, høy betongtykkelse, og mye mannskap ved montering. Løsningen er ufleksibel i områder med nisjer og ved evt. behov for breddeutvidelser. Kontaktstøpen kan inngå som en del av permanentsikringen og sterkt redusere volumet av sikring. Dette vil bedre økonomien i løsningen. (Jernbaneverket, 2015)



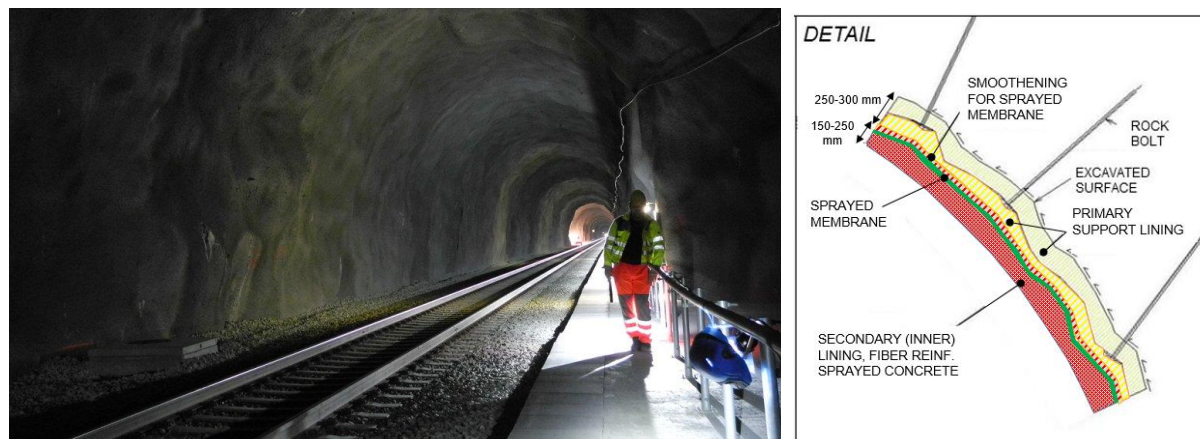
**Figur 10: Plasstøpte betonghvelv med foliemembran. Venstre: Drenerende tunnelkledning. Høyre: Udrenerende tunnelkledning. (Holter, 2017b)**

En nylig utvikling for plasstøpt betonghvelv er teknisk løsning for å finne løsning for punktlekkasjer. (Holter, 2017b) Figur 10 viser både drenerende og ikke drenerende løsning for plasstøpt betonghvelv.

### 3.2.3. Permanent sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran

Løsningen er teknisk innovativ, og har utviklet seg gradvis de siste 11-13 årene. Kledningen er anvendt i enkelte land, og teknisk funksjon og egenskaper for løsningen er essensielt forskjellig fra andre løsninger for tunnelkonturer. Teknisk gjennomførbart under visse forhold, og optimalisering av sprøytebetongtykkelsen er mulig. Figur 11 viser løsningen utført i Gevingåstunnelen. (Holter, 2017b)

Figur 11: Venstre: Utført sprøytebetongkledning med sprøytbar membran i Gevingåstunnelen. Høyre:



Design av sprøytebetongkledning med sprøytbar membran. (Holter, 2017)

Sprøytebetong med sprøytbar membran er i prinsippet en udrenert tunnelkledningstruktur. Tunnelkledningen er brukt i situasjoner med delvis drenering, hvor tunnelsålen ikke har noen vanntetting og vann tillates å lekke inn i tunnelrommet gjennom sålen innenfor fastsatte lekkasjekrav. Kledningen kan også brukes som heldekkende vanntett tunnelkledning. I denne situasjonen har en udrenert konstruksjon, med fullt hydrostatisk vanntrykk mot tunnelkledningen. (Holter mfl., 2015)

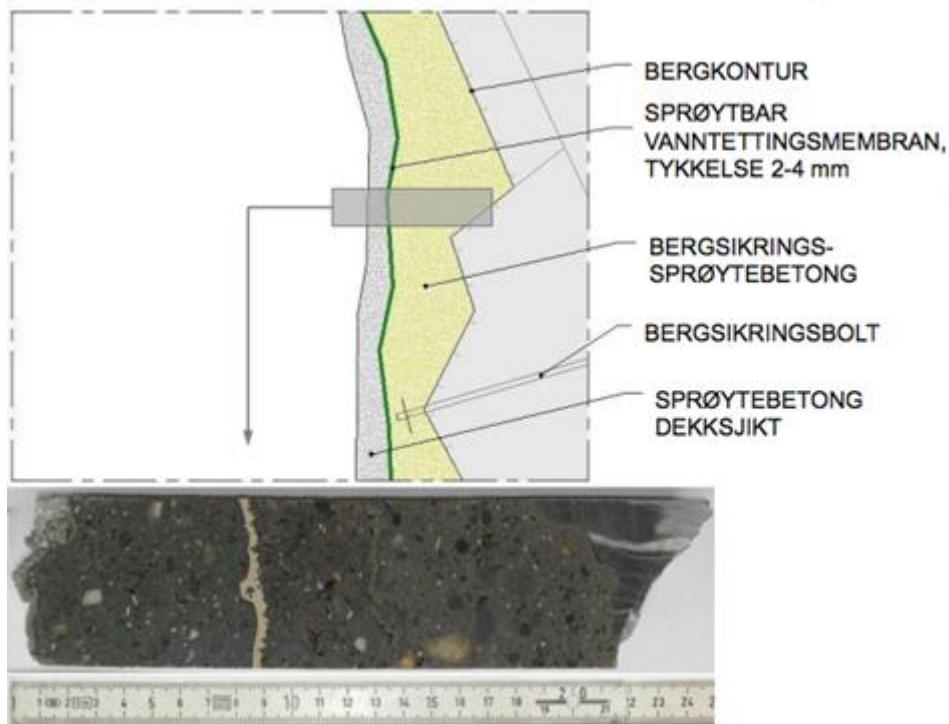
Bruken av sprøytbar membran og sprøytebetong egner seg ikke i tunneler med store vannproblemer, da membranen er vannløselig. Hydrogeologiske forhold må vurderes nøye i hvert enkelt tilfelle der denne tekniske løsningen vurderes brukt. I relativt tørre tunneler kan det være en gunstig og rimelig metode. I Norge benyttes bergmassens selvbærende evne, og da egner denne metoden seg godt i en del tilfeller. Steder hvor denne løsningen er brukt er i Bærumstunnelen, Gevingåstunnelen og Holmestrandtunnelen. (Garathun, 2016)

Partiene med sprøytebetong og sprøytbar membran i Gevingåsen tunnel og Holmestrandtunnelen overvåkes og følges opp for å bygge og dokumentere erfaring og kvalitet. (Jernbaneverket, 2015)

Løsningen er fleksibel under påføring og kan enkelt benyttes i områder med nisjer og ved endringer i profil. (Jernbaneverket, 2015)

Vedlikehold på punktlekkasjer i driftsfase må påregnes, men på grunn av konstruksjonens begrensede tykkelse kan dette gjøres ved reetablering direkte på eksisterende flate. (Jernbaneverket, 2015)

Tunnelkledningens oppbygning består av en kontinuerlig sandwichstruktur, se Figur 12. Det innerste laget består av bergsikring med sprøytebetong og bergbolter. Det midterste laget består av en sprøytebetong membran for vanntetting som er minimum 2mm. Det ytterste laget består av sprøytebetong. Kledningen tillater innlekkasje ved sålen eller i dreneringskanaler. Det er da forventet at kledningen er drenert. Vanntrykket ved tunnelkonturen forventes maksimum å kunne nå 1-1,5 bar. (Holter, 2013)



**Figur 12: Design for sprøytebetong med sprøytebetong membran. (Holter, 2013)**

Dagens teknologi for utførelse av denne kledningstypen innebærer et behov for nøye kvalitetskontroll av flere deler av byggeprosessen. Dette gjelder spesielt ruheten til sprøytebetongoverflaten som membranen påføres på, og håndtering av dryppunkter ved midlertidig drenering og injeksjon. En ytterligere forbedring av både membranprodukter og utførelsesmetodikk vil gjøre denne kledningsmetoden godt egnet for bruk i hardt berg. En tilrettelagt anbudsbeskrivelse av sprengningskvalitet (kontur) og sprøytebetong for membranunderlag, samt evt. justering av krav for resultatet av forinjeksjon, vil være hensiktsmessige tiltak for å øke teknisk gjennomførbarhet og redusere kostnader ved denne løsningen. (Jernbaneverket, 2015)

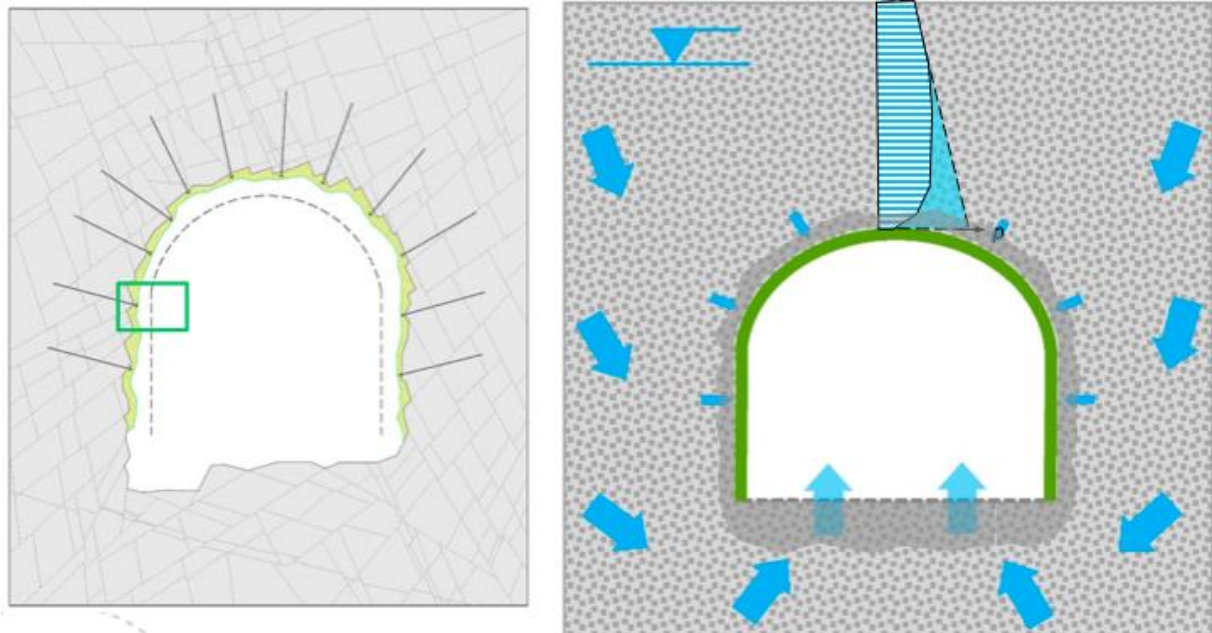


### 3.2.4. Oppsummering av løsninger for tunnelkledning i jernbanetunneler

Tabell 2: Tunnelkledninger for jernbane og deres egenskaper (Basert på Jernbaneverket. 2015)

Tunnelkledning	Kostnader	Montering	Materialer	Vedlikeholdsbehov	Anvendt	Levetid	Drenert
<i>Frittstående hvelv</i>	Lav-Høy	Krevende operasjon med spesialutstyr	Løsningen har mange komponenter	Middels/høyt	Avtagende	Middels/høy	Udrenert
<i>Kontaktstøp</i>	Lav	Krever mye rigging og forarbeid	Stort betong-forbruk	Lavt	Høy	Høy	Drenert
<i>Sprøytebetong med sprøytebar membran</i>	Høy	Enkel montering med enkelt utstyr	Lite materialforbruk	Middels	Lite/under utvikling	Høy	Delvis drenert

### 3.3. Fremtidige utredninger



**Figur 13: Drenerende oppsprukket sone, som gir trykkredusert sone. Delvis drenert tunnel i hardt berg, drenert såle uten vanntetting. Vanntrykket blir da redusert mot henget. (Holter, 2015b)**

I dag har Norge en rekke typegodkjente løsninger for tunnelkledninger. For miljøet er det bra å fokusere på levetid og vedlikeholdskostnader. Å velge en tunnelkledning som ikke trenger så mye vedlikehold under levetiden, vil være gunstig med tanke på økonomi og miljø. Ved å standardisere løsninger og dermed begrense antall varianter vil kunnskapen konsentreres og kunnskapen for de aktuelle løsningene øker.

Feltforsøk (Holter, 2015a) har vist at en moderat trykkoppbygging bak membraner oppstår grunnet konduktiviteten i bergmassen. Trykket bygges ikke opp til nær teoretisk høyeste vanntrykk, heller ikke til et trykk som kan skade konstruksjonen. Trykkoppbyggingen er forårsaket av vannets evne til å ta "minste motstands veg". Vannet går i bergets sprekkesystem fram til den drenerte sålen. De første 20-40cm fra den sprengte konturoverflaten, EDZ, har ut ifra feltforsøk vist seg å ha en drenerende effekt. Se Figur 13. Denne kunnskapen kan brukes videre ved design av tunnelkledninger hvor vannsikringen er i direktekontakt med bergsikringen.

### 3.4. Tester gjort for målinger av vanntrykk mot tunnelkledning

Det er ikke funnet eksempler på at det har oppstått skader som følge av vanntrykk i drenerte tunneler med membraner. (Jernbaneverket, 2015) Over tid vil det sannsynligvis felles ut mineraler og avsettes leirpartikler i sprekkene inn mot tunnelen slik at drenasjekapasiteten mot sålen reduseres (Statens vegvesen og Jernbaneverket, 2015) Dette vil kunne medføre noe høyere vanntrykk inn mot membranen over tid.

Tuttle (2016) har sett på påvirkningen kontaktstøpt tunnel har av trykket mot tunnelkonturen. Det er sett på en situasjon med forinjeksjon, slik at en har en tetteskjerm. Vanntrykket er avhengig av overdekningen til tunnelen, permeabiliteten for fiberduken og permeabiliteten for tetteskjermen.

**Tabell 3: Trykknivå for lav og høy overdekning mot permeabilitet for tetteskjerm fra induksjon og permeabilitet for fiberduk. Høyest trykk ved høy overdekning, høy permeabilitet på tetteskjermen og lav permeabilitet på fiberduken. (Tuttle, 2016)**

Overdekning	Utførelse	Permeabilitet skjerm/duk (H = høy, L = Lav)			
		H/H	H/L	L/H	L/L
90 m (dobbeltspor)	Drenert	27.75	23.58	13.02	15.28
	Full utstøpning	34.03	39.86	19.03	24.3
	Trykkforskjell, reell	6.28	16.28	6.01	9.02
	Trykkforskjell, %	22.63	69.04	46.16	59.03
590 m (enkeltspor)	Drenert	127.7	139.1	61.1	66.6
	Full utstøpning	151	170	70.9	80.2
	Trykkforskjell, reell	23.3	30.9	9.8	13.6
	Trykkforskjell, %	18.25	22.21	16.04	20.42

Drenering av grunnvann inn i tunnelen vil være betinget av fordeling og nivå på vanntrykket på injeksjonsskjermen. Dersom man antar likt utgangspunkt i total vanntrykk vil en injeksjonsskjerm som har en høyere permeabilitet medføre større vannlekkasjer inn i tunnelen. (Tuttle, 2016)

Permeabiliteten på fiberduken har også noe å si for totaldrenasjen inn i tunnelen, når den er permeabel bidrar den til drenering og en jevnere fordeling av trykket. Permeabiliteten til en fiberduk blir redusert ved tetting, da forflyttes vanntrykket mot sålen og medfører en større totallekkasje. Dette er pga. omfordeling av vanntrykk mot sålen av tunnelen når fiberduken blir tett. (Tuttle, 2016)

## 4. Hydrogeologi

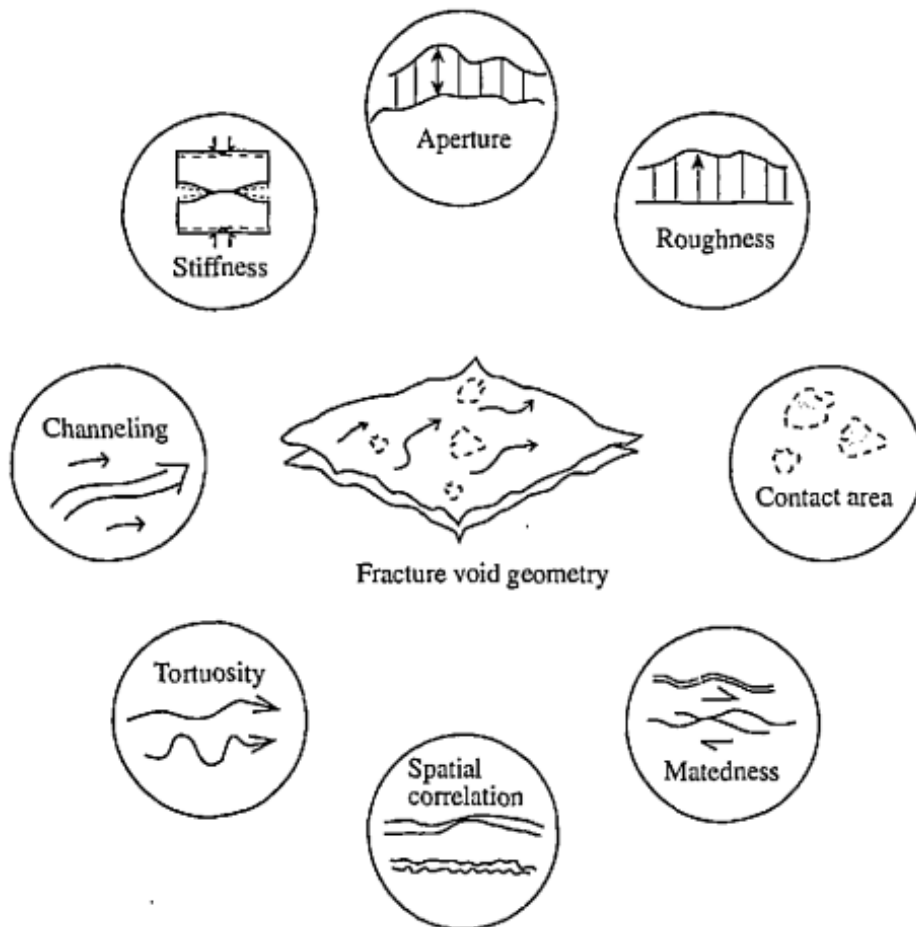
### 4.1. Sprekkes karakter

Grunnvannstømmning i berg skjer i sprekke. Berg har andre egenskaper og en annen geometri enn sedimenter, hvor strømmningen skjer i porene. (Gustafson, 2009)

Mange artikler har omhandlet beskrivelser av individuelle sprekker basert på fordelingen av sprekke. Blant disse er Hakami (1995) og Zimmermann and Bodvarsson (1996).

I noen tilfeller vil mesteparten av grunnvannsstrømmningen gå gjennom en enkelt sprekke, mens i andre tilfeller vil grunnvannsstrømmningen skje gjennom et nettverk av sprekker. I begge tilfellene er det behov for kunnskap om hvordan væsken strømmer gjennom en enkelt ru bergsprekk. (Zimmermann og Bodvarsson, 1996)

Hakami(1995) bruker åtte parametere for å karakterisere sprekke, se Figur 14. De åtte parametrene er: sprekkebredde, ruhet, kontaktflate, skjær i kontaktflaten, korrelasjon i avstand, strømningsveg, kanaler og stivhet.



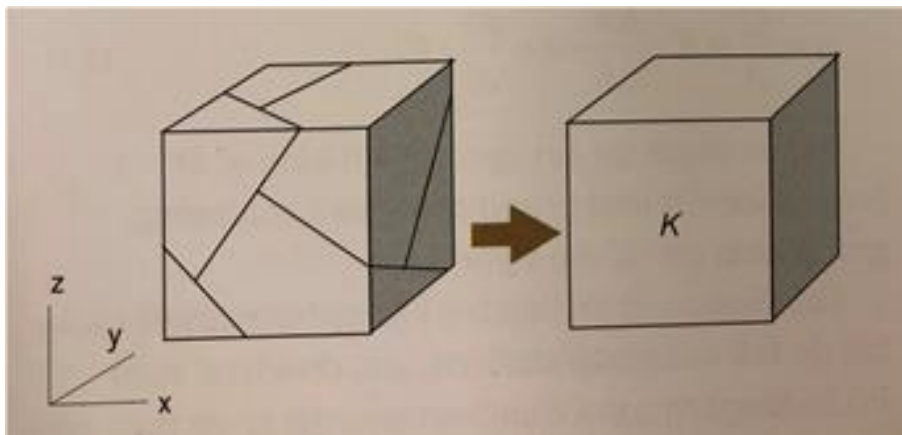
Figur 14: Sprekkeegenskapene bestemt av sprekkeåpningsgeometri

## 4.2. Grunnvannsstrømning i oppsprukket berg

Det finnes flere metoder for å estimere den hydrauliske ledningsevnen i berget. To parametere for å beskrive ledningsevnen til berget er konduktivitet og transmissivitet.

Grunnvannsstrømningen i oppsprukket berg skjer som tidligere nevnt i sprekkene. Type bergart, bergets forfatning og vannstrømning avgjør hva slags form oppsprekningen lager. Typer former oppsprekningen kan ha er kanaler, rør eller diskler. (Stille, 2015)

Strømningen gjennom bergmassen kan i prinsipp beskrives av summen av den reelle strømningen gjennom sprekkene. For å regne den samlede strømningen i en seksjon holder det ikke å kun addere strømningen gjennom hver enkelt sprekk. Dette er grunnet strømningen i sprekkene ikke er uavhengige. Det er en kompleks oppførsel. (Stille, 2015)



Figur 15: Berget som ekvivalent kontinuum. (Gustafson, 2015)

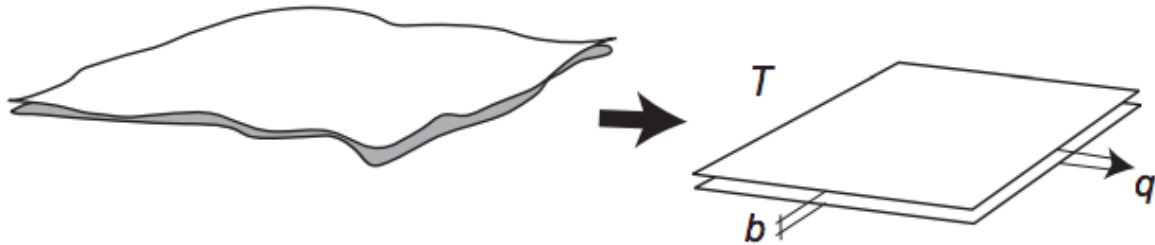
Når gjennomstrømningen av vannet gjennom berg beskrives er det vanlig å betrakte berget som en enhet, et ekvivalent kontinuum, se Figur 15. Det vil si at berget anses som homogent og bergets egenskaper utjevnes innad i berget. Ved denne metoden uttrykkes gjennomstrømning gjennom berg med en hydraulisk konduktivitet,  $K$  [m/s]. Den hydrauliske konduktiviteten er definert som en proporsjonalkonstant for et porøst medium i Darcys ligning, se Ligning 2. (Gustafson, 2009)

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad \text{Ligning 2}$$

Darcys ligning uttrykker at vannstrømningen  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] gjennom et rør med tverrsnittareal  $A$  [ $\text{m}^2$ ] er proporsjonal mot den hydrauliske gradienten  $dh/dl$  [-]. Ligningen forutsetter laminær strømning. Denne forutsetningen går ut på at det er mulig å summere treghetskrefter som oppstår når strømningen skifter retning, dvs. turbulens. (Gustafson, 2009)

Det er en forenkling å tenke på berget som et kontinuum. I virkeligheten er berget mer komplekst. Dette medfører forenklet evalueringen av hydrauliske tester og innstrømningsbetraktninger med tanke på beskrivelse av bergets ledningsevne, før f.eks. injisering for å vannsikre tunnellop. (Emmelin mfl. 2007)

Betraktninger med antagelser om kontinuum har vist seg å gi ganske rimelige resultater. Dette er under forutsetninger om at bergmassen kan approksimeres som homogen. Typisk for oppsprukket berg er at det finnes en skalaeffekt, men dette er ved større bergvolum. Ved vannstrømning gjennom enkeltsprekker, ses det på bergmassen i en mye mindre skala. (Gustafson, 2009)



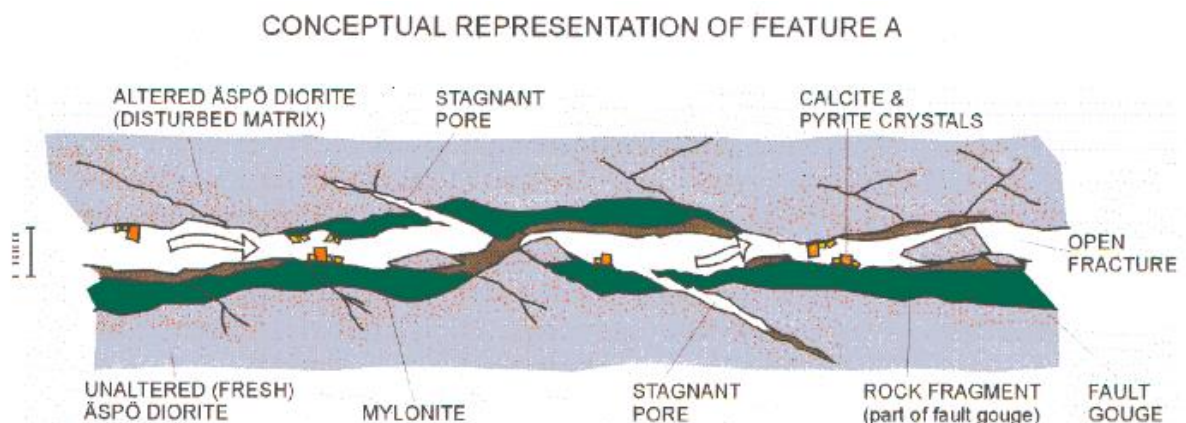
Figur 16: Sprekk fremstilt som en todimensjonal leder av grunnvann. (Gustafson, 2009)

En sprekk kan betraktes som en todimensjonal struktur med en spalte hvor vannet strømmer, se Figur 16. Mengden vann som strømmer gjennom sprekkene uttrykkes med proporsjonalkonstanten transmissivitet  $T$  [ $m^2/s$ ]. (Gustafson, 2009) Transmissiviteten er direkte proporsjonal med den hydrauliske konduktiviteten  $K$  [ $m/s$ ] og mektigheten til "akviferen",  $b$  [ $m$ ]. Se Ligning 3.

$$T = K \cdot b$$

Ligning 3

I fremstillingen er det ikke tatt med fyllmateriale og det er viktig å tenke på at selv om gjennomstrømming gjennom en sprekk estimeres med en parallell-plate teori er det forskjell i sprekkebredde. Figur 17 viser en illustrasjon av en naturlig sprekk. (Emmelin mfl., 2007)



Figur 17: Illustrasjon av en sprekk med varierende sprekkebredde og varierende fyllmateriale (Winberg mfl., 2000)

Transmissiviteten kan brukes for å uttrykke vannstrømningen fra bergmassen til seksjoner i borhull. Seksjonens transmissivitet beregnes ved å multiplisere den hydrauliske konduktiviteten med lengden på seksjonen (Thörn J., mfl., 2015)

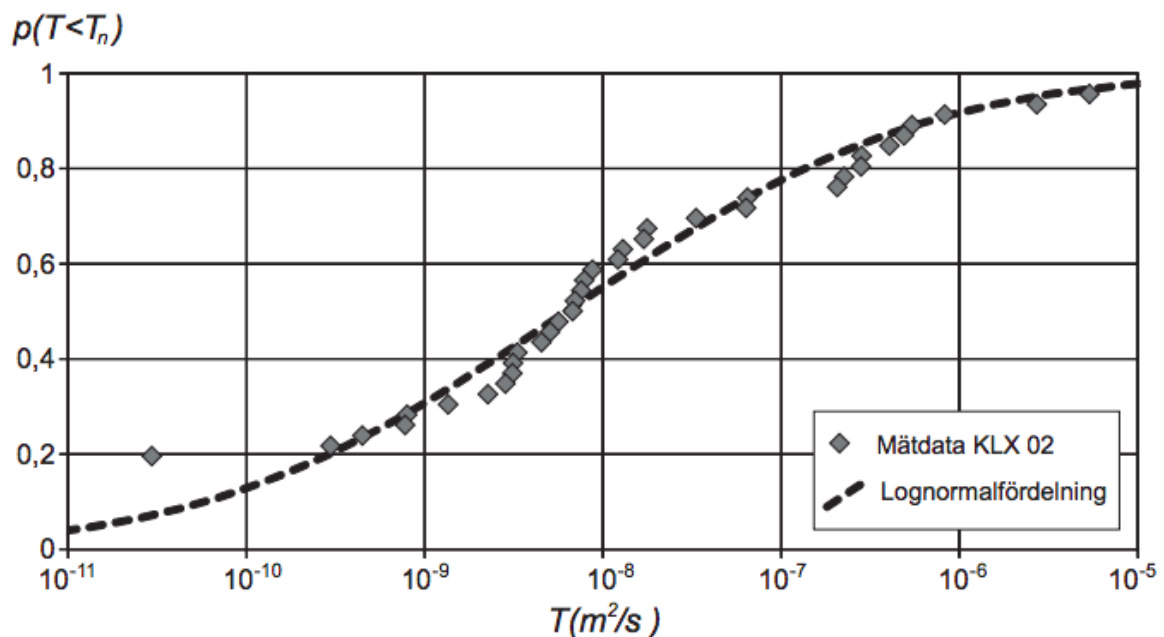
Vanntransporten gjennom en sprekk kan også relateres til sprekkebredden. I en sprekk er bredden ujevn, noe som fører til ujevn vannstrømningsfordeling i sprekkene, og det blir vanskelig å karakterisere vannstrømmen i sprekkene. Den effektive hydrauliske sprekkebredden utnyttes, noe som forenkler sprekkene til en idealisert, planparallell spalte. Den hydrauliske sprekkebredden  $b_{hyd}$  [m] kan kobles til sprekkens transmissivitet  $T$  [ $m^2/s$ ] med den kubiske formelen, se Ligning 4. (Snow, 1968) Her tilsvarer  $b_{hyd}$  avstanden mellom to parallelle plater representert som  $b$  i Figur 16.

$$b_{hyd} = \sqrt[3]{\frac{12\mu T}{\rho g}} \quad \text{Ligning 4}$$

Ikke alle sprekker som krysser et borehull eller tunneler er vannbærende. Mange sprekker er godt forbundet og lukket, det vil si at seksjonen er mindre vannbærende enn summen av kapasitetene til de forskjellige sprekkene. (Stille, 2015)

Lognormalfordelingen er en fordeling som ofte nevnes i sammenheng når hydraulisk konduktivitet eller transmissivitet for berg skal beskrives, se Figur 18. Det har blitt observert at hydraulisk testdata vanligvis har en tilnærmet lik kurve som den naturlige logaritme. (Stille mfl, 2003; Gustafson og Krásny, 1994)

Gustafson (2009) betrakter at selv om hoveddelen av dataene som plottes i en graf er tilpasset det naturlige logaritmen, er viktet for de høyeste verdiene store. Videre diskuterer Gustafson problem som oppstår når lognormalfordelingen skal passes til en datamengde, hvor en del data mangler. Fremstillingen er en sannsynlighetsfordeling, hvor det ses på sannsynligheten for at transmissiviteten for en vilkårlig sprekk  $T$  er mindre enn for en sprekketransmissiviteten  $T_n$ . (Gustafson og Fransson, 2005)



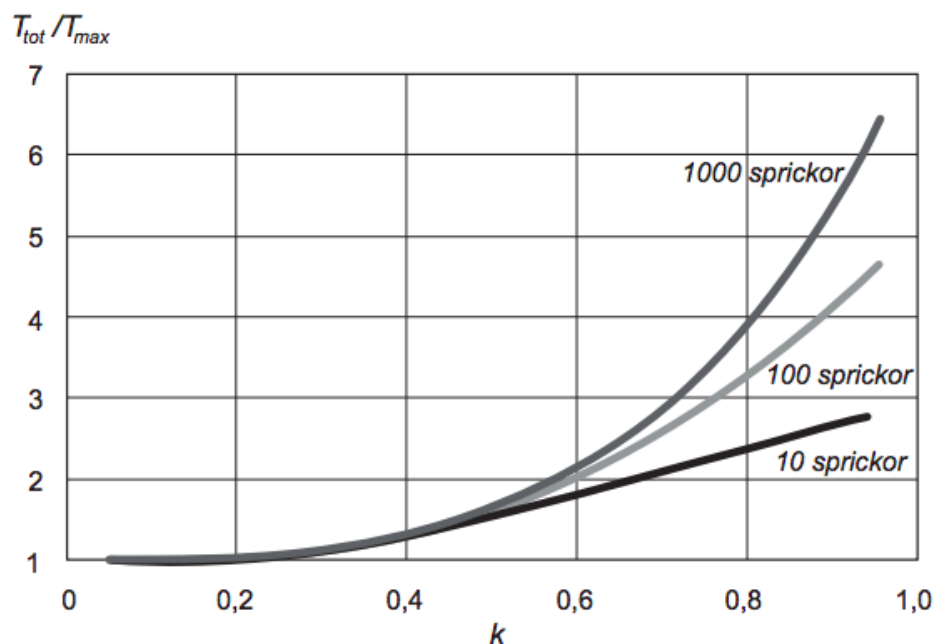
Figur 18: Kumulativt fordelingsfunksjonsdiagram med intervalltransmissiviteter for et borhull (KLX02), samt en passende lognormalfordeling. (Modifisert av Thön mfl, 2015 fra Gustafson 2009)



Figur 19 presenterer ett diagram som viser relasjonen mellom formparameteren  $k$ , antall sprekker og transmissiviteten hos den største sprekken  $T_{\max}$  i forhold til transmissiviteten for hele borhullet  $T_{\text{tot}}$ . Fordelingen er en potensfordeling som er eksponentiell. Fordelingen, Paretofordelingen, reflekterer den typiske variasjonen i sprekke-transmissivitet som fins i oppsprukket, krystalinsk berg, det vil si et fåtall store sprekker og mange små sprekker. (Gustafson og Fransson 2005)

(Gustafson, 2009) klargjør:

- Om det er få sprekker i et intervall er den største sprekken alltid av samme størrelsesorden som intervalltransmissiviteten.
- Om  $k$  er mindre enn en halv er den største sprekken alltid av samme størrelsesorden som intervalltransmissiviteten.
- Desto større  $k$ , desto mindre utgjør den største sprekken en vesentlig del av den totale transmissiviteten



**Figur 19:** Forholdet mellom transmissiviteten for hele borhullet og transmissiviteten hos den største sprekken  $T_{\text{tot}}/T_{\text{max}}$  som funksjon av ulike verdier på formparameteren  $k$  og ulikt antall sprekker. (Modifisert av Thön mfl, 2015 fra Gustafson 2009)

Ved å sammenligne Figur 18 og Figur 19, ses det at ved høy oppsprekking utgjør den største sprekken en mindre del av den totale transmissivitet. Vannet strømmer i flere sprekker. Dette gjør at ved et tilfeldig valg av en sprekke  $T$  er det sannsynlig at sprekken er mindre enn sprekke-transmissiviteten. Ved lav oppsprekking utgjør den største sprekken den totale transmissiviteten.



### 4.3. Estimering av bergmassens egenskap til gjennomstrømning

Ved injeksjonsdesign er det vanskelig med direkte undersøkelser av sprekke. Derfor blir designet av injeksjon basert på usikkerheter. Forundersøkelsene består av å finne ut hvordan det hydrogeologiske forholdet er i berget rundt f.eks. en tunnel. (Emmelin mfl., 2007) Dette er relevant for masteroppgaven, bruker mye av den samme kunnskapen. Viktige ingeniørgeologiske parametere som kan brukes er:

- Transmissivitet ved bruk av seksjonsvise hydrauliske tester langs borhullet.
- Kartlegging av sprekkeavstand, sprekkeorientering og kontakt mellom sprekke.
- Grunnvannshøyde ( $\Delta h$ ), helning i terreng og bergspenninger.

Basert på disse egenskapene kan et teoretisk injeksjonsdesign bli valgt. (Eriksson 2002, Gustafson og Stille 2005)

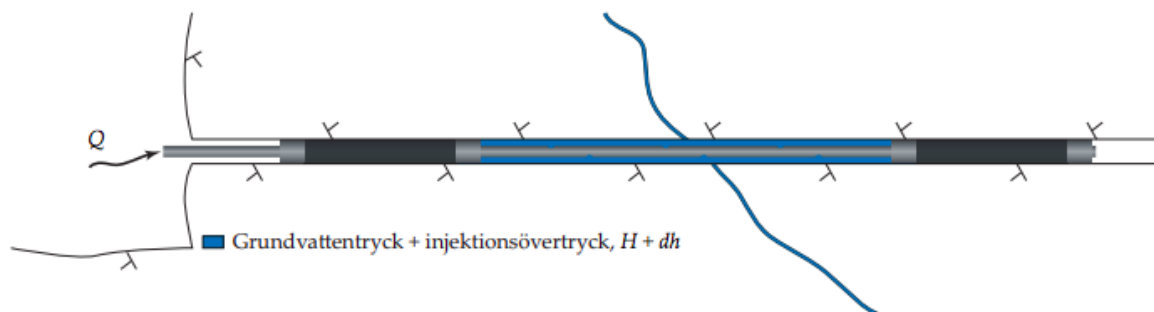
### 4.4. Testmetoder for målinger av strømning i berg

Det finnes flere metoder for å måle den hydrauliske konduktiviteten og vannstrømningen i berg. (Stille, 2015) Tre av disse metodene er:

- 1) Finne hydraulisk konduktivitet ved bruk av Lugeon-test
- 2) Finne transmissivitet i oppsprekkningszone ved bruk av strømningslogging
- 3) Måling av vanntrykk

I denne masteren er det brukt metode 2: «Finne transmissivitet i oppsprekkningszone ved bruk av strømningslogging.» Testmetoden innebærer at vann presses inn i en borhullsseksjon under et visst konstant trykk. For å kunne gjennomføre målinger i seksjoner skjermes borhullet av en dobbeltpacker. Det vil si at seksjonen blir avgrenset av to packere, se Figur 20. Data som genereres fra injeksjonstester omfatter vannstrøm  $Q$  [ $m^3/s$ ] og trykknivået  $\Delta p$  [Pa]. Med relativt enkle beregningsformler kan dataene estimere en beskrivelse av bergmassens egenskap til gjennomstrømning, dette er forutsatt at bergmassen beskrives som ett homogent kontinuum med hydraulisk konduktivitet  $K$  og en transmissivitet  $T$ . (Gustafson 2009)

Testene baserer seg på at det antas at det oppnås stasjonær tilstand i slutten av testene. Det vil si at  $Q$  og  $\Delta p$  er konstante på slutten av testene.



Figur 20: Prinsippskisse av injeksjonstest med dobbeltpackere. Her er seksjonen lengre enn for testene gjort i masteren. (Thörn J., mfl., 2015)

## 4.5. Beregning av transmissivitet ved injeksjonstest

Det finnes flere metoder for å beregne transmissiviteten. Formelen som anvendes til utregning av transmissiviteten er avhengig av hvilken test som er brukt. To parametere som alltid er viktige under testene er vannstrømning  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] og forskjell i trykkehøyde  $\Delta h$  [m].

Generelt gir en kort-tids-måling informasjon om sprekkesystemet i nærhet til borhullet, mens lang-tids-måling beskriver forholdene i større utstrekning. (Hernqvist, 2009)

Valg av formel for beregning av transmissiviteten baseres på hva slags sprekk en har og hvordan sprekken er koblet til berget rundt. Formelen som en antar beskriver situasjonen best blir valgt. To av formlene som skal brukes er basert på den naturlige logaritmen. Disse formlene er Moyes formel og Mansjettmålings formelen.

### 4.5.1. Moyes formel

Moyes formel (Moye, 1967) er en analytisk beregningsformel som brukes for å estimere transmissiviteten i en seksjon. Seksjonen er begrenset av avstanden mellom packerne.

$$T = \frac{Q\rho g}{2\pi\Delta p} \left[1 + \ln\left(\frac{L}{2r_w}\right)\right] \quad \text{Ligning 5}$$

- $T$ : Seksjonens transmissivitet [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $Q$ : Vannstrømning i slutten av testperiode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\rho$ : Vannets densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $g$ : Jordakselerasjonen [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
- $\Delta p$ : Konstant injeksjonstrykk [Pa]
- $L$ : Lengde av seksjon. Avstand mellom packere [m]
- $r_w$ : Radius til borehull [m]

Ligningen forutsetter en todimensjonal og radiell vannstrømning i området  $L/2$  fra borhullet. I området utenfor avstanden  $L/2$  fra borhullet er vannstrømningen tredimensjonalt. (Moye, 1967)

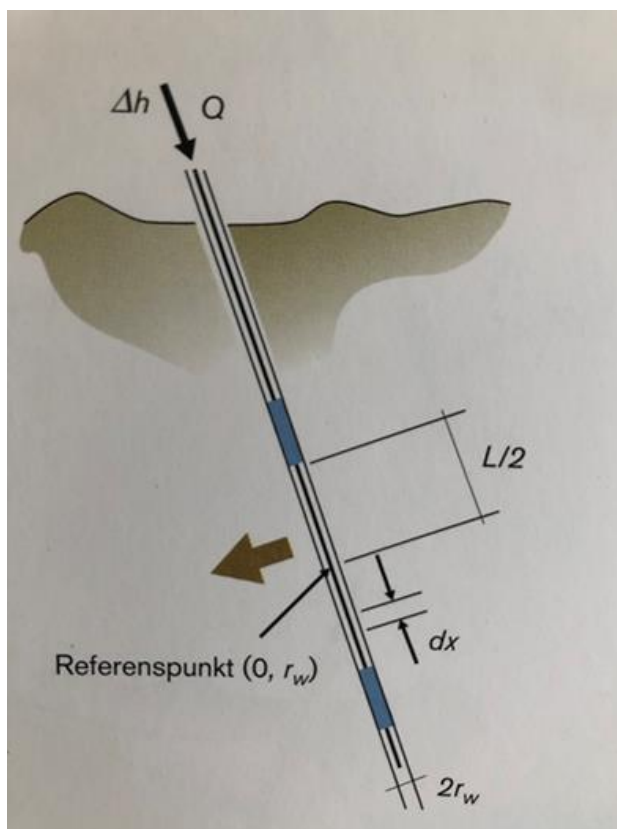
#### 4.5.2. Mansjettmålingsformel

Transmissivitet funnet fra denne formelen gir tilnærmet den samme verdien som Moyes gir. Der  $\Delta h$  regnes u fra Ligning 1 for hydrostatisk trykk. (Gustafson, 2009)

$$T = \frac{Q}{2\pi\Delta h} \ln\left(\frac{L}{r_w}\right) \quad \text{Ligning 6}$$

- T: Seksjonens transmissivitet [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- Q: Vannsstrømning i slutten av testperiode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\Delta h$ : Trykkehøyde/Differanse i grunnvannsnivå [m]
- L: Lengde av seksjon. Avstand mellom packere [m]
- $r_w$ : Radius til borehull [m]

Metoden er mest egnet til bruk der lengde av seksjonen L er mye større enn radius av borhull. Se Figur 21 for fremstilling av vanninjeksjonsmålinger for Moyes formel og Mansjettmålingsformel. Det er Moyes formel og Mansjettmålingsformelen som brukes for å beregne transmissiviteten i masteren.



Figur 21: Vanninjeksjonsmåling for Moyes formel og Mansjett formel (Gustafson, 2009)

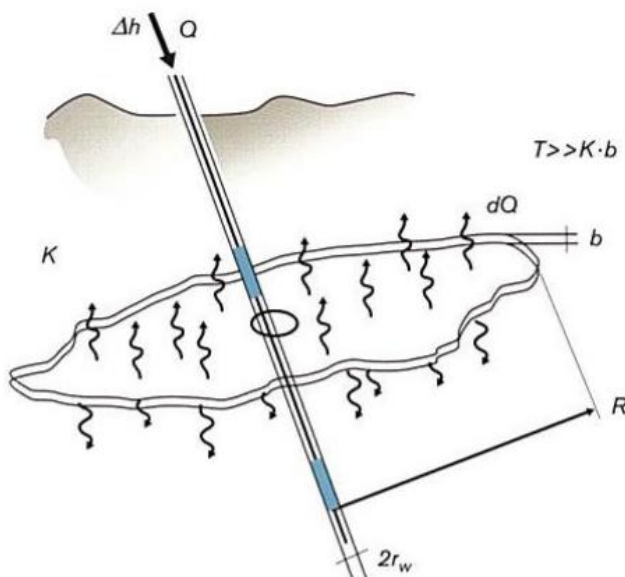
### 4.5.3. Gustafsons formel

Gustafson formel er en analytisk beregningsformel som brukes for å estimere transmissiviteten i sprekker. Gustafsons formel brukes ved intakt berg som ved krystallinsk berg hvor konduktiviteten i sprekken er mye høyere enn i berget rundt, se Figur 22. Da blir trykktapet i sprekken relativt neglisjerbart. (Gustafson, 2009)

$$T = \frac{QL}{2\pi R\Delta h}$$

Ligning 7

- T: Transmissivitet i sprekk [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- Q: Vannsstrømning [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\Delta h$ : Trykkehøyde/Differanse i grunnvannsnivå [m]
- L: Avstand mellom packere [m]
- R: Estimert kontinuitet av sprekk



Figur 22:Hydraulisk test i en konduktiv sprekk(Gustafson, 2009)

Formelen er brukt for kort konduktiv sprekk. Denne metoden ble ikke bruk for beregning av transmissivitet i masteren. Ved bruk av denne formelen og ved bruk av Thiems brønnligning, må en anta en estimert influensradie R.

Ved EDZ som er i ytterste sone av borhullet, vil det bli galt å anta en verdi for influensradien R som skal gjelde for alle målingene i borhullet. Målingene ytterst gir ikke et inntrykk av berget lengre inn i borhullet, siden konduktiviteten her er annerledes enn konduktiviteten vil være lengre inne i borhullet.

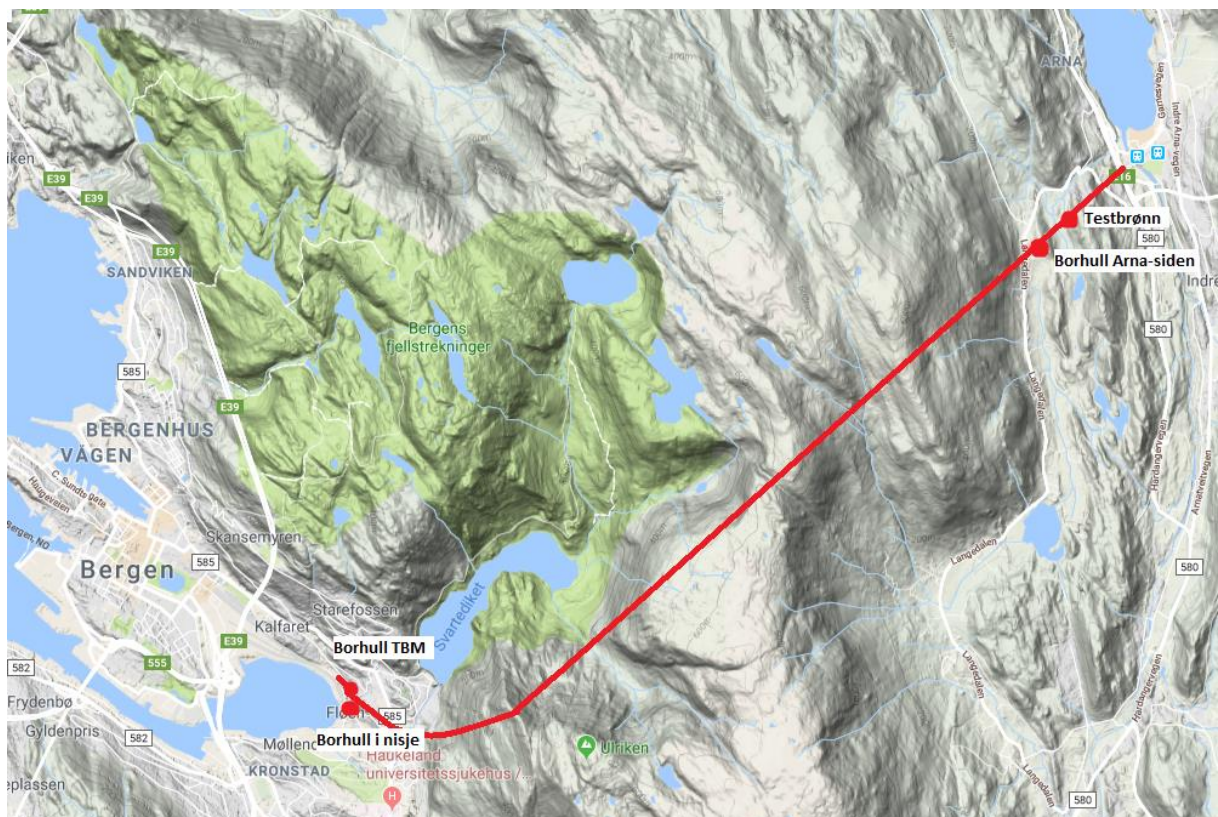
## 5. Feltarbeid på anleggsområdet til nye Ulriken tunnel

### 5.1. Anleggsområdet

Feltundersøkelsene ble utført i det nye tunnellopet gjennom Ulriken. Jernbanetunnelen går mellom Arna og Fløen i Bergen, parallelt med eksisterende tunnellop. Tunnellopet ble drevet ved konvensjonell driving og ved bruk av TBM. Undertegnede var i Bergen i tre omganger. I førsteomgang på Arna-siden for kjerneuttak. I andreomgang for å bfare under hydrostatiske målinger i borhullene på Arna-siden. I siste omgang på Fløen-siden for ny omgang med kjerneuttak.

Stedene hvor det har blitt utført kjerneuttak, samt lokasjon av testbrønn for grunnvannshøyde er vist i Figur 23. Det ble utført 20 kjerneuttak i tunnellopet på Arna-siden. Ti i TBM-delen og ti i den sprengte delen. På Fløen-siden ble det utført ti kjerneuttak. Fem i TBM-delen og fem i en sprengt nisje. Alle borhullene er lokalisert i tunnelveggen vendt bort fra eksisterende tunnellop. Dette er for å unngå at grunnvannstrykket som blir målt blir påvirket av eksisterende bergrom.

Det ble utført in-situ vanntrykksmålinger i valgte borhull på Arna-siden. Testene ble utført i både borhull fra TBM-drevet tunnel og konvensjonelt drevet tunnel.



**Figur 23:** Kart over Arna og Bergen, med tunnellopet tegnet med rød strek. Testbrønn og lokasjoner av kjerneuttak er plottet på kartet med røde sirkler. (Redigert topografisk kart fra Google Maps)

## 5.2. Regionalgeologi

Bergartene mellom Arna og Fløyen består av bergartskomplekser fra tre skyvedekker som er skjøvet inn under den Kaledonske fjellkjedefoldningen. Skyvedekkerne inneholder bergarter som varierer fra ulike omdannede magmatiske og sedimentære bergarter. (Norconsult, 2011)

Det er ulik geologisk situasjon for Arna-siden og Fløyen-siden. Vedlegg 1 viser lengdeprofil for nye Ulriken tunnel. Ser ut fra vedlegget at borkjerne fra Arna-siden er i sonen med anortositt og stedvis metagabbro, mens borkjernene fra Fløyen-siden er i sonen med mylonittgneis.

Tabell 4 viser bergartene som ble møtt under feltundersøkelser i Ulriken-tunnelen. Undertegnede fikk hjelp av professor Allan George Krill og professor Mai Britt E. Mørk til å kartlegge bergartene på Arna-siden under borkjerneloggingen.

**Tabell 4: Bergartsbeskrivelse**

Bergart	Beskrivelse
Mylonittgneis	For det meste granittisk. Mer skifrig enn de øvrige gneisene på tunnelstrekningen. Inneholder igjengrodde sprekker med mineralfylling(kvartsårer).
Anortositt	Grovkornet magmatisk bergart. Har noe av den opprinnelige grovkornede mørke plagioklasen (Ca-rik). (Krill og Mørk, 2018)
Anortosittisk gneis/metaanortositt	Metamorfosert ved amfibolitt-facies (tilgang til vann, og lavere temperatur enn eklogitt facies.) All plagioklas er metamorfosert til Na-rik plagioklas, og antagelig Ca-zoisitt. Pyroksen er metamorfosert til svart amfibol. (Krill og Mørk, 2018)
Metagabbro	Tung, mørkegrønn og metamorfisert magmatisk bergart.
Korona anortositt	Metamorfosert ved eklogitt-facies. Det er litt av den opprinnelig plagioklas, og litt av den opprinnelig svart pyroksen. Utenfor den svarte pyroksen har det kommet en grønn eklogitt-pyroksen og en rød eklogitt granat. Disse er i ring rundt pyroksen og kalles for en "korona". (Krill og Mørk, 2018)



### 5.3. Kjerneuttak på Arna-siden

Sommeren 2017 ble det utført kjerneuttak av 20 kjerner i grensen mellom sprengt tunnel og tunnel drevet med TBM. Ti var i den sprengte delen og ti var i den borede delen. Avstanden mellom borhullene er på ca. to meter. Etter at kjernene ble tatt ut ble de plassert i trekasser som ble lagd på anleggsplassen. Før transporten ble det plassert trebiter i kassene for å unngå unødvendig store bevegelser av borkjernene under transporten. Dette var for å minske feilkilden som kan oppstå om borkjernene får hard medfart. Figur 24 viser kjerneuttak og lokasjon av boringen. Ved å se på ingeniørgeologiske forundersøkelser Vedlegg 1 og undersøkelser gjort av ingeniørgeolog underveis i drivingsfasen, Vedlegg 2, kan det ses at alle borhullene er utenfor svakhetssoner. Ser utfra Vedlegg 1 at overdekningen ligger på omtrent 160 meter.

Kjernene ble tatt ut med en helning på ca.10 grader. Dette var for at vann skulle renne ut av borhullene og at finstoff produsert under borkjerneuttaket lettere skulle renskes ut. Borkronene som ble benyttet hadde en diameter som var tilpasset at det skulle utføres hydrauliske målinger i borhullene senere. Diameteren var på 76mm.

Det var påført mye sprøytebetong i den sprengte delen (1,5meter på det tykkeste) for å utjevne skillet mellom TBM-løp og sprengt-løp. Dette var for at griperne til TBMen skulle få tak under drivingen. Sprøytebetongmektigheten medførte vanskelige arbeidsforhold for de som utførte borkjerneuttaket. Utstyret var ikke beregnet for å bore så dypt.

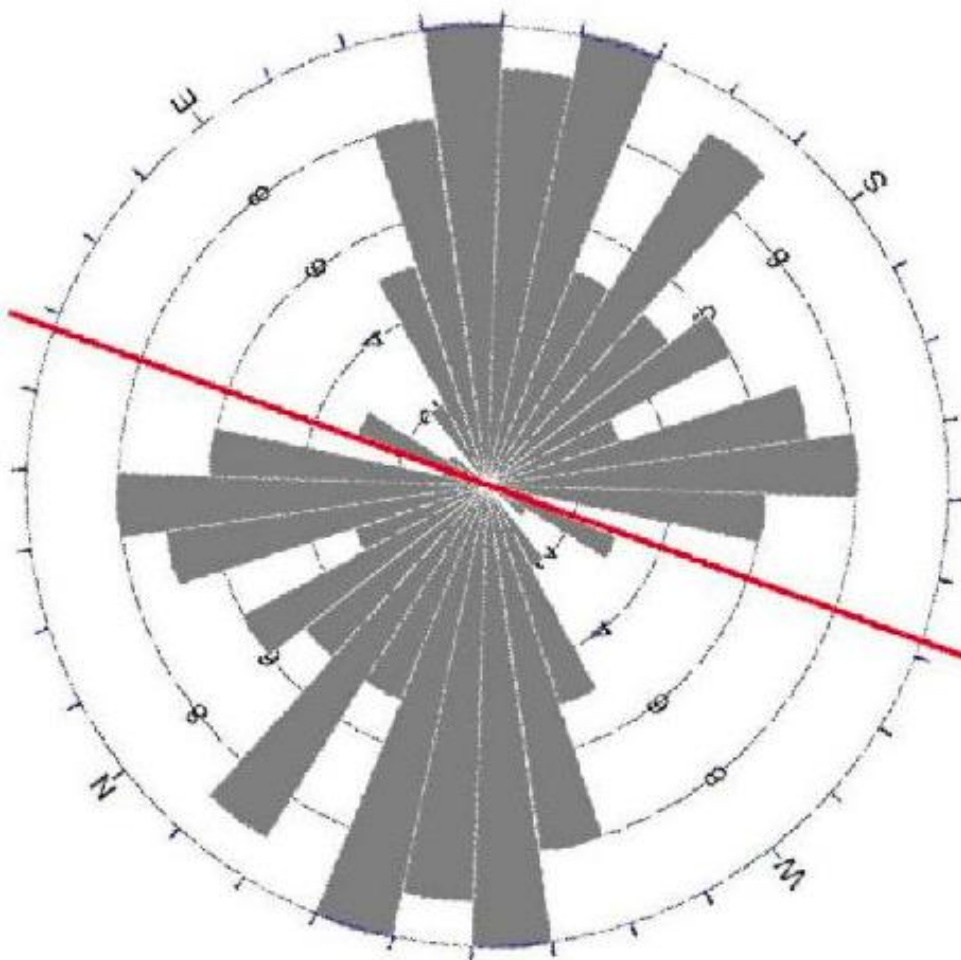


Figur 24: Venstre: Kjerneuttak på Arna siden. Høyre: Tunnelløpet sett i retning mot Arna med sprengt del lengst unna.

### 5.3.1. Sprekkesett for Arna-siden

Vedlegg 2 viser ingeniørgeologisk kartlegging utført av Bane NOR i NovaPoint for grensen mellom TBM- og Sprengt-tunnelløp. Borhullene(4-23) er lokalisert fra pelnummer 462935 til pelnummer 462973 og markert i vedlegget. Sprekkekartleggingen var noe mangelfull, det er kun de mest vanlige sprekkene som er tatt med. Ved borkjeneloggingen som ble utført senere ble det observert flere sprekker enn det vedlegget tilsier. Grunnet påført sprøytebetong kunne ikke undertegnede utføre ingeniørgeologisk undersøkelse av tunnelkonturen.

Ut fra Figur 25 ses valg av retning på tunneltraseen ut fra sprekkeretningene. Undertegnede fikk tatt en tur lengre inn i tunnellopet der TBMen stod. Der var det ikke påført sprøytebetong og sprekkene var tydelig vinkelrett på tunnellopet. Denne sprekkerosen er grov, da den gjelder for hele tunnellopet og er designet før driving. Ved å sammenligne sprekkerosen og kartleggingen i Vedlegg 2, kan en se en svak trend til at sprekkene står vinkelrett på tunnellopet.



Figur 25: Sprekkerose ut fra forundersøkelser gjort før driving av tunnelen. Rød strek viser retning på tunneltraseen. (Fra Vedlegg 1) (Bane NOR, 2017)



## 5.4. Kjerneuttak på Fløen-siden

Januar 2018 ble det utført kjerneuttak av ti nye kjerner, denne gangen på Fløen-siden. Grunnen til at det ble utført nye kjerneuttak var for å få en større datamengde. Arna-siden har en veldig varierende geologi, noe som gjør det vanskelig å trekke en slutning.

Fem av kjernene ble tatt fra hovedtunnelen som er drevet med TBM (Borkjerne 6 til 10). De fem andre kjernene (Borkjerne 1 til 5) ble tatt i en nisje i en tilkomsttunnel til hovedtunnelen, se Figur 26. Avstanden mellom de to lokasjonene er på ca. 40 meter. Det ble antatt at dette ikke vil ha innvirkning på resultatene når kjernene skulle sammenlignes. Lokasjonen til borhullene er plottet i Vedlegg 4. Pelnummer 469 659 for nisjen, mens borhullene fra TBM-delen er lokalisert fra pelnummer 469 695 til 469 703. Avstanden mellom borhullene i TBM-delen er på to meter. Borhullene i nisjen har varierende avstand. Grunnen til variasjonen er forholdene i nisjen. Kjerneuttakene ble tatt fra områder som var sikre (ikke fare for nedfall av stein) og at utstyret kunne plasseres stødig.

Ved kjerneuttak i nisjen ble det ikke utført kjerneuttak i stoffen, da denne delen av nisjen blir mer påvirket av drivingen. Sprengladninger blir plassert i stoffen under driving.

Nisjen hadde kun sprøytebetong i hengt. I veggene var det satt i bolter enkelte steder. Dette gjorde det mulig for ingeniørgeologisk kartlegging.



**Figur 26:** Bildet til venstre: Nisje hvor borkjerne 1-5 ble tatt ut for Fløen-siden. Kjernene ble tatt på venstre side av nisjen. Bildet til høyre: Plassering av nisje (lengst til høyre) i tverrslaget i forhold til tunneløpet drevet med TBM som kan ses til venstre i bildet.

### 5.4.1. Sprekkesett for Fløen-siden

Vedlegg 3 og Vedlegg 4 viser sprekkekartlegging utført av Skanska-Strabag for området hvor kjerneuttak ble gjennomført. Borhullene for TBM-sonen er markert i Vedlegg 4 med blå sirkler. Nisjen er plassert med et oransje punkt i Vedlegg 4.

Utfra sprekkekartleggingen i vedleggende får en et innblikk i den ingeniørgeologiske situasjonen bakom sprøytebetongen i TBM-delen. Av Vedlegg 1 ser en at borhullene er i nærheten av en svakhet. Ved uttak av kjerner, så en at det tydelig var en svakhetssone et stykke inn i borhullene, se Figur 33 med borkjernene 6-10. Ser det bl.a. innerst i borkjerne 10. Ved tunnelåpningen med TBM er all ingeniørgeologisk antagelser tatt utgangspunkt i observasjoner gjort av ingeniørgeologer fra Skanska-Strabag.

Sprekkekartleggingen brukes til å se om sprekkefinnes igjen i borkjernene. Da nisjen ikke var 90 grader på tverrslaget for alle borhullene (1-5) ble det ugunstige forhold for å angi avstanden mellom sprekkesettene.

Strøk og fall målingene fra tunnellopet kan ikke brukes optimalt videre ved borkjerneloggingen. Grunnen er at en ikke vet opprinnelig retning på borkjernen etter at den er tatt ut fra borhullet. En mulig løsning i dette tilfellet er ved bruk av Optisk Televiewer (OPTV). OPTV benyttes til inspeksjon av borhull ved å filme innvendig borehullsvegg.

Området i nisjen ble antatt å ha en RQD-verdi på 50. Se Figur 27 for berget i nisjen. RQD, verdien for tunnelveggen normalt på veggen det ble boret ble estimert til å ha en RQD-verdi på 75.



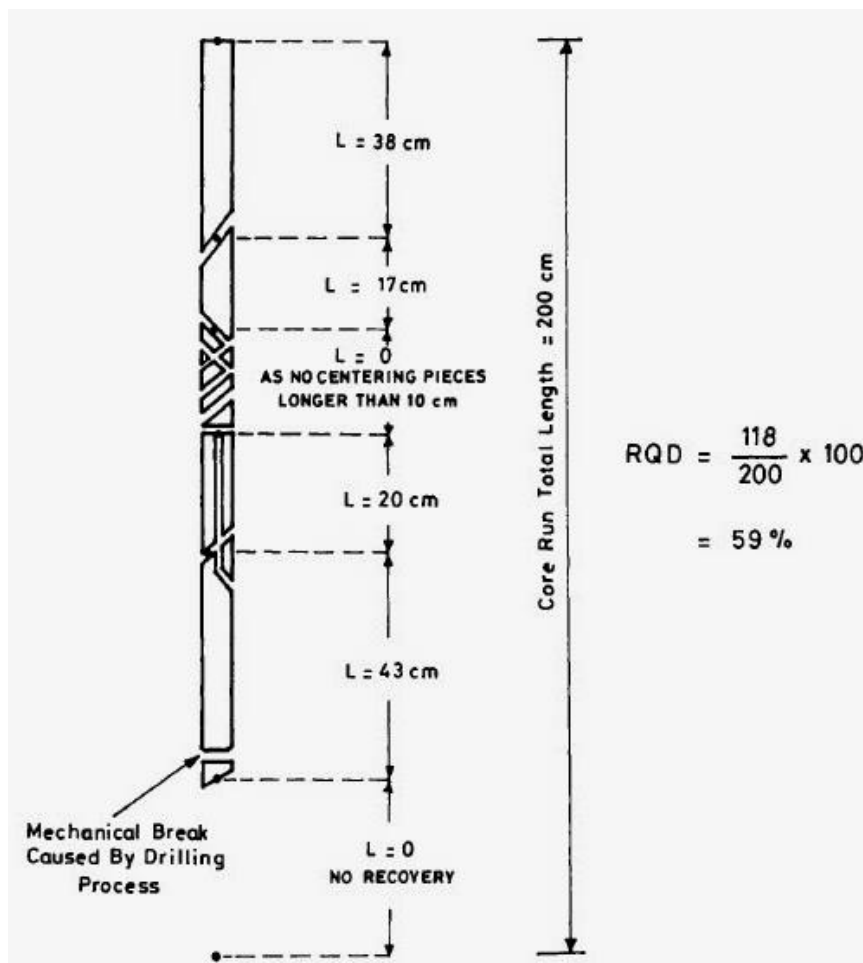
Figur 27: Kjerneuttak i nisjen

## 6. Borkjernelogging

For å kunne analysere den hydrogeologiske tilstanden i berget trengs en kartlegging av bergmassen. Ved kjennskap om sprekkeene kan en få en mer nøyaktig fremstilling av den hydrogeologiske tilstanden i berget. Under borkjerneloggingen blir parametere som RQD, sprekkeavstand bestemt, og sprekkenes karakter blir beskrevet.

For borkjernene fra Arna-siden blir sprekkeavstand og RQD blir fremstilt i Vedlegg (5-25), mens sprekkenes karakter blir beskrevet i Excel-filen lagt ved som vedlegg. Borkjerne 3-13 er fra sprengt del, og borkjerne 14-23 er fra TBM-drevet del.

### 6.1. RQD-verdi og sprekkeavstand



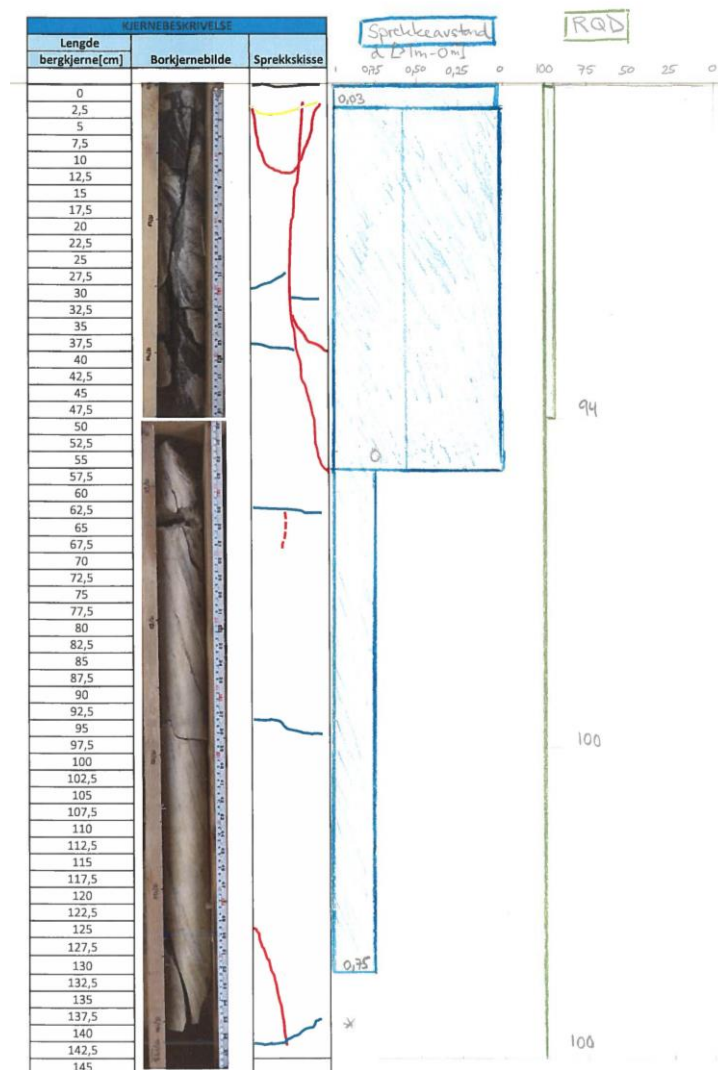
Figur 28: Fremgangsmåte for å regne ut RQD (Deere, 1989)

Bergmassekvaliteten blir fremstilt ved bruk av Rock Quality Designation (RQD). I fremstillingen RQD-verdier for borkjernene fra Arna-siden er det valgt soner på 50cm, slik at det blir angitt tre RQD-verdier per kjerne. Det er vanlig å bruke intervaller på én meter, men i de situasjonene er borkjernene lengre. Under RQD-bestemmelsen er Figur 28 brukt. Et eksempel på dette er ved borkjerne nr. 15, se Figur 29. Her er det en langsgående sprekke, langs med borkjerneaksen. I illustrasjonen til Deere (1989) vil dette bli angitt som intakt berg. En ulempe ved å sette dette som intakt berg er at det gir et galt bilde, med tanke på konduktiviteten.

Vann kan strømme i denne sprekken. RQD er ikke den beste metoden å fremvise sprekken i borhullene. Denne metoden relaterer ikke sprekkeantall til de hydrauliske testede seksjonene. (Thörn J., mfl., 2015)

En annen ulempe ved bruk av RQD er at selv om det er forskjell i sprekkekarakter innad i sonene vil ikke dette tas hensyn til ved bruk av RQD. I tillegg påvirkes ikke RQD-verdien av sprekker med sprekkeavstand på over 10cm. Her blir RQD-verdien den samme som om det er intakt berg.

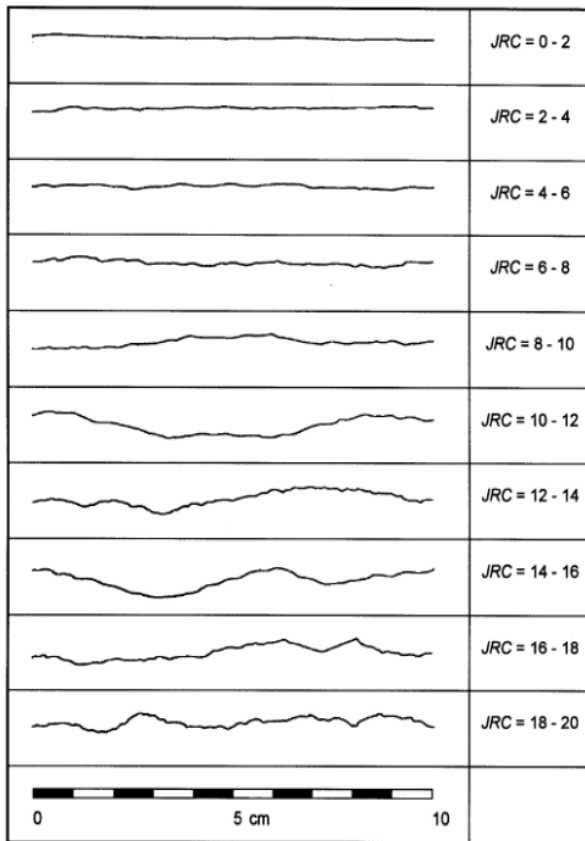
En bedre fremstilling av sprekken i borkjernene er ved å angi sprekkeavstand d. Her tas plasseringen av sprekken med. Fremstillingen er nøyere og mer presis, siden det blir lettere å sammenligne sprekkeavstand mot vannstrømningen og transmissiviteten. Der det er høyt oppsprukket bruker man minste bit. For borkjerne 15 ser en da forskjell i kartleggingen for sprekkeavstand og RQD. Ved sprekker som krysser kjerneaksen på skrått er det tatt for midtpunktet av sprekken



Figur 29: Sprekkeavstand og RQD for borkjerne 15.

## 6.2. JRC

For å fremstille sprekkenes karakter brukes Joint Roughness Coefficient (JRC), ved bruk av skjemaet i Figur 30 og redskapet vist i Figur 31. (Barton og Choubey, 1977)



Figur 30: Joint Roughness Coefficient, JRC, for forskjellige sprekkeoverflater. (Barton og Choubey, 1977)



Figur 31: Redskap brukt under fremstilling av sprekkenes ruhet (JRC).



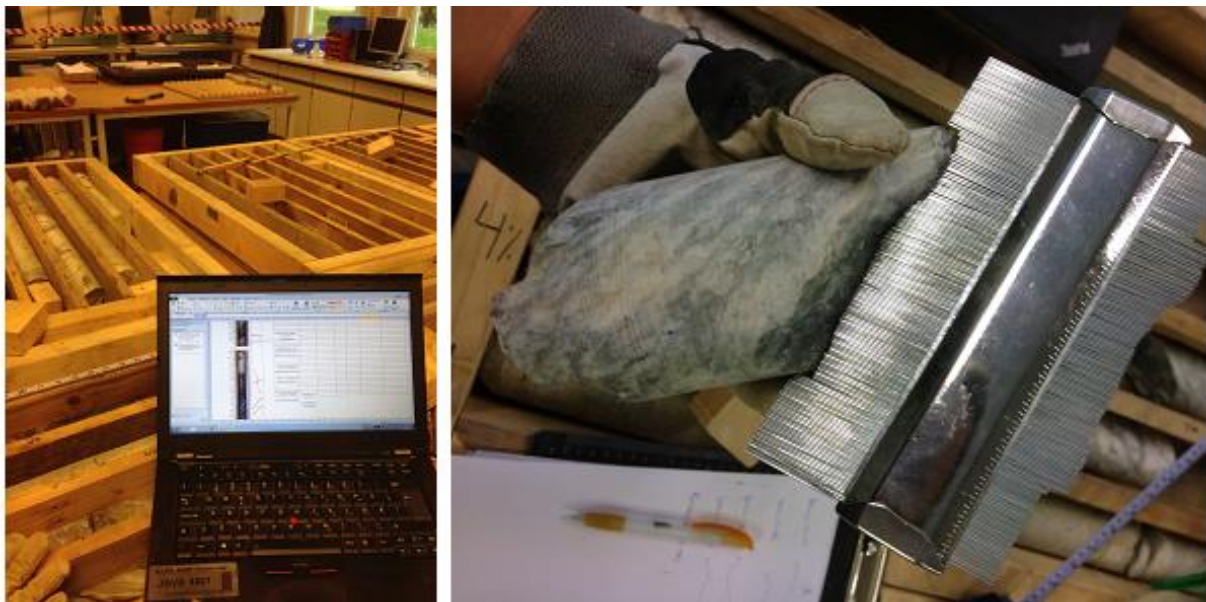
### 6.3. Borkjernelogging for Arna-siden

En mer detaljert borkjernelogging er vedlagt som Excel-fil. Filen inneholder beskrivelse av sprekkekarakter og vedlagte bilder av ruheten til sprekken (JRC). Ut fra Excel-filen er det tatt ut bilder av borkjerneloggingen med avstand fra bergoverflaten med en sprekkeskisse ved siden av. Videre er det her skissert sprekkeavstand og RQD-verdier. (Vedlegg 5-25)

Excel-filen inneholder kartlegging av borkjernelogging med bilde av kjernen, skisse av sprekkenes plassering, beskrivelse av sprekken og karakterisering av type sprekke og skisse av sprekkenes ruhet(JRC). I Excel-filen representerer blå strek, unaturlig sprekke, forårsaket av borkjerneuttak. Rød strek representerer naturlig forekommet sprekke og kan være f.eks. foliasjonssprekk, lagdelingsprekk eller sprekke induisert av spenninger. Gul strek er påtegnet for situasjoner hvor undertegnede er usikker på om det er en naturlig sprekke eller sprekke forårsaket av borkjerneuttaket. Stjerne i Excel-filen representerer høyt oppsprukket bergmasse. Stiplet linje lukket sprekke eller svakhet.

Det viktigste ved sprekkekartleggingen er å angi om det er åpne sprekker, delvis åpne sprekker eller lukkede sprekker. Det forventes ikke at en lukket sprekke skal bidra til vannstrøm i seksjonen. En åpen sprekke kan påvises ved å se om det er et belegg av f.eks. leire. En lukket sprekke kan f.eks. være sammenkittet av et felsisk belegg.

Sprekker som opprinnelig har vært kittet sammen av felsisk belegg, har flere steder blitt kartlagt som åpne for borkjernelogging i nærhet av bergoverflaten for borkjernelogging fra den sprengte delen. Dette kan forklares med at denne sonen, EDZ, har blitt påvirket under driving, slik at til vanlig lukkede sprekker har åpnet seg.



Figur 32: Borkjernelogging og valg av JRC ved bruk av "Steel Profile Gauge" av kjerneloggingen fra Arna-siden

Etter at borkjernene er logget er det funnet en trend i både sprekkeavstand og RQD-verdier for sonene innad og sonene hver for seg.

I den sprengte delen ble det kartlagt sprengningsskadesone i umiddelbar nærhet av tunnelkonturen. Området ligger på i hovedsak mellom (20 og 50cm) Noen steder er det ikke sett noen tydelig oppsprukket sone. Forskjellig grad av størrelse på EDZ, dette kan være grunnet plasseringen av ladningene under drivingen av tunnelen. En annen grunn kan være forskjellen i grad av naturlig oppsprekking i berget fra før. Alt i alt, ses det at sprekkeavstanden og RQD-verdien er lavere i sonen nærmest bergoverflaten, i forhold til lengre inn i borhullet.

Tydlig at ikke alle sprekke i EDZ har oppstått naturlig. Det ses ved at sprekke i EDZ ikke var langs med en foliasjon, eller ikke var fra et naturlig sprekkesett. Så det også ved å se på overflatene, ikke glatte overflater, som det ble observert flere steder i foliasjonssprekkene.

Basert på borkjernene fra TBM-delen ser en at berget ikke har blitt like påvirket av drivingen. Flere tilfeller hvor RQD-verdien er høyere i nærheten av tunnelkonturen i forhold til lengre inn i borhullene hvor RQD-verdiene er lavere.

## **6.4. Borkjernelogging for Fløyen-siden**

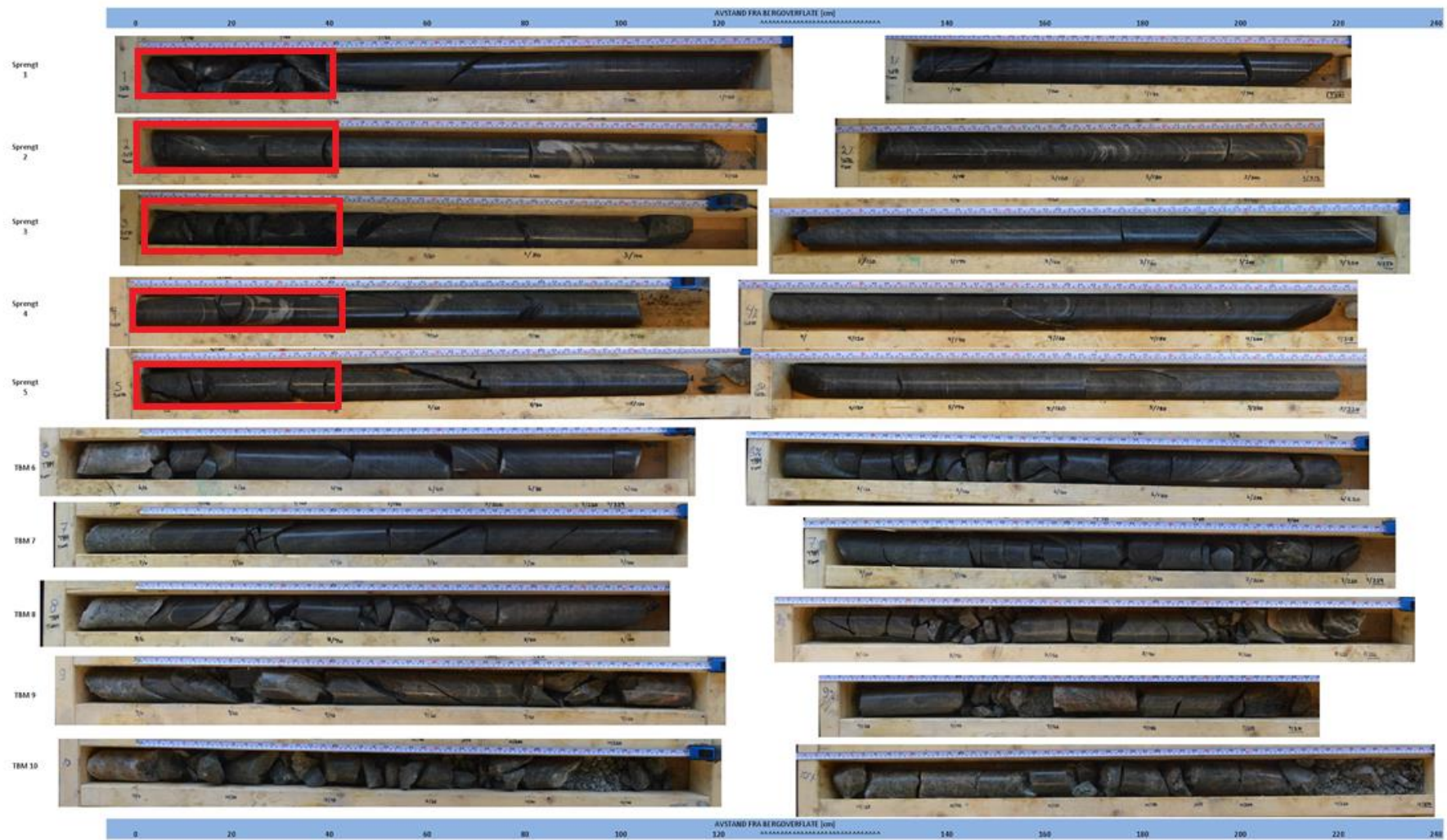
Se Figur 33 for borkjernene fra Fløyen-siden. Ser at borkjernene fra den sprengte delen, borkjerne 1-5, ikke er helt sammenlignbare med borkjernene fra TBM-delen, borkjerne 6-10. Borkjernene i nisjen er mer intakte enn borkjerne i TBM-delen. Det blir da feil å sammenligne TBM-kjernene mot Sprengt-kjernene.

Det blir sammenlignet grad av påvirkning innad i kjernene. For TBM-delen ser en at graden av oppsprekking ikke er større i umiddelbar nærhet av bergoverflaten i forhold til lengre inn i borhullet. Det er mer oppsprekking lengre inn i borhullet.

For borkjernene fra nisjen ser en tydelig sprengningsskadesonen (EDZ) ytterst i borkjernene. Denne sonen er på ca. 40cm for alle borkjernene fra den sprengte delen. Se markert område i Figur 33. Bergmassekvaliteten til borkjernene fra denne delen er bedre lengre inn i borhullet.



**Figur 33: Borkjernene(1-10) for Fløyen-siden. 1-5 er fra nisjen(sprengt), mens 6-10 er fra TBM-delen. Stor forskjell i grad av intakt berg. Kjernene er plassert for å vise samme avstand fra bergoverflate. Sprengningsskadesonen er markert med røde rektangler.**



## 7. Hydrauliske målinger i Ulriken

Hydrauliske tester kan brukes for å evaluere sprekkers evne til å lede vann, sprekkenes transmissivitet. Under målingene i Ulriken ble det benyttet utstyr spesialisert på måling av hydraulisk konduktivitet i en sprengningsskadesone(EDZ) utviklet av Geosigma. Spesialiseringen av utstyret gikk ut på kortere avstand mellom packerne, enn for standard utstyr, noe som gir kortere seksjoner.

Målinger av in-situ vanntrykk ble utført i borehullene på Arna-siden i månedsskiftet august/september 2017. De hydrauliske målingene ble utført etter borkjernelogging av kjernene fra borhullene var gjennomført. Dermed hadde en et grunnlag for valg av borhull hvor det skulle utføres hydrauliske målinger. Borhull med sprekker som var karakteristiske, slik at den hydrogeologiske situasjonen skulle bli lettere å forklare ble valgt.

Ved valg av borhull det skulle utføres hydrauliske målinger i, var det flere ting som spilte inn. Det optimale var å ha et likt antall målinger fra den sprengte delen og den borede delen. Dette var for å sammenligne transmissiviteten i sprengningsskadesonen mot transmissiviteten i en sone hvor TBM er brukt under driving. En annen situasjon som spilte inn for valg av borhull var sprøytebetongtykkelsen. Det var mektig sprøytebetongtykkelse i tunnellopet som var drevet konvensjonelt, dette gjorde at en ikke fikk tatt målinger i mange seksjoner for hvert borhull. Borhullene som hadde minst sprøytebetong ble valgt, alle borhull med mer enn 86cm sprøytebetong ble valgt bort. Utstyret var ikke egnet til å måle lang inn i forhold til tunnelkonturen. Enkelte steder i tunnelen var det uegnet for utstyret å stå, borhullene lokalisert ved disse stedene ble også valgt bort.

Det ble utført hydrauliske målinger i fire borhull fra TBM-delen (18,22,21 og 23). Fra den sprengte-delen ble det også utført målinger i fire borhull (9,11,12,13). Målingene var ikke optimale og ga forskjellig gyldighet, men et bilde av forholdene ble dannet.

I TBM-delen var berget så intakt at packerne ikke tålte mottrykket som den injiserte vannmassen skapte. Derav ble packerne trykket ut ved noen tilfeller.

I den sprengte delen var deler av borhullene så oppsprukket at noen av vannstrømmingene ikke lot seg måle, da vann strømmet ut av borhullene og maks vannstrømning ble målt. Disse observasjonen gir et inntrykk av den høye konduktiviteten i disse sonene.

### 7.1. Utstyret

Utstyret, som kan ses i Figur 34, bestod av flere bestanddeler. WIC (Water Injection Controller) kontrollerte vannstrømningen som ble injisert, slik at injeksjonstrykket ble konstant. WIC-en logger kontinuerlig dataen fra testene i csv-filer. Pumpesystem har kapasitet på en vannstrøm på mellom 0,0001 liter/min til 1,79771 liter/minutt.

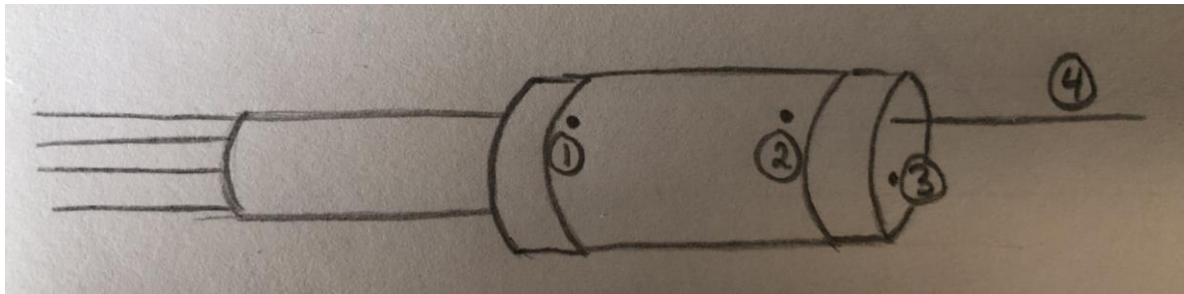
Ellers bestod utstyret av en vanntank, en nitrogentank, ledninger og mansjetter. Vannet fra vanntanken ble ledet ut gjennom en ledning mellom WIC-en og seksjonen i borhullet.



**Figur 34: Utstyret bruk til hydrauliske målinger. Øverst: Registreringsutstyret med vanntank. Nederst til venstre: Mansjetter med forskjellige lengder på seksjonene. Dobbeltpackerne har seksjoner på 10cm og 20cm, Enkeltpackeren har valgbar seksjonslengde. Måler innerst i borhullet. Nederst til høyre: Nitrogentank for trykkoppbygging.**

Testseksjonene er isolert av to individuelle packere. Utstyret som ble benyttet i Arna bestod av mansjetter med forskjellig seksjonslengder. Packerne blir utvidet i borhullet ved bruk av en vanntank som er under trykk. Nitrogentanken ble brukt for trykkoppbyggingen. Testseksjonene til dobbeltpacker-testene har en lengde på enten 10cm eller 20cm. Enkeltpacker-testene måler forskjellige lengder på seksjonene, da testseksjonen er innerst i borhullet. Derfor vil enkeltpacker-test ofte ha en lengre testseksjon enn det en dobbeltpacker-test har.





**Figur 35:** Skisse av dobbeltpacker med nummererte innganger. 1 og 2 er for vann inn og ut av seksjonen. 3 er for å injisere vann inn i observasjonsområdet, innerst i borhullet. 4 er for å få luft ut av observasjonsområdet.

Innganger til dobbeltpackere, illustrert i Figur 35

1. Vann injiseres i seksjonen mellom packerne.
2. Vann tas ut fra seksjon mellom packerne.
3. Injiserer vann inn i observasjonsområdet, bakom packerne.
4. Luft tas ut fra observasjonsområdet ved bruk av justerbar plastslange.



**Figur 36:** Til venstre: Ser inngang 3 og 4. Til høyre: Forbindelser til de fire inngangene forklart over.

Den regulerbare slangen suger ut luft fra observasjonsområdet innerst i borhullet, se Figur 36. Utsuging av luft kombinert med injisering av vann fører til helt vannfylt borhull.

## 7.2. Målte parametere



Figur 37: Bilde av parametere registrert i systemet.

Parametere registrert under målingene er: Flow, T<sub>air</sub>, P<sub>air</sub>, P<sub>botl</sub>, P<sub>sect</sub> og P<sub>obs</sub>, se Figur 37. Ser bort fra P1 og P2, da disse parameterne ikke ble brukt, og viste 0 kPa for alle målingene.

- **Flow:** Viser vannstrømningen som går i seksjonen. Seksjonen er avgrenset av packere og seksjonene har forskjellige lengder etter type utstyr som ble brukt. [l/min]
- **T<sub>air</sub>:** Viser temperaturen i området. I tilfellet for disse målingene var det temperaturen i tunnelen. [°C]
- **P<sub>air</sub>:** Viser lufttrykket. [kPa]
- **P<sub>botl</sub>:** Trykket i tanken med vann. [kPa]
- **P<sub>sect</sub>:** Trykket i seksjonen, området mellom packerne. Måles i absolutt trykk [kPa]
- **P<sub>obs</sub>:** Trykket i observasjonsområdet, innerst i borhullet.

Parametere som brukes til fremstilling av de hydrauliske målingene senere er Flow og P<sub>sect</sub>. Flow og P<sub>sect</sub> fremstilles på y-aksen mot tid på x-aksen. For å få en gyldig fremstilling skal trykket stagnere slik at et konstant trykk oppstår. Det samme gjelder for vannstrømningen.

### 7.3. Fremgangsmåte

Før hver test ble borhullene skylt for å renskes for borslam og småfraksjoner fra oppsprukket berg. Utstyret ble plassert på et plant grunnlag. Utstyret registrerer data for hvert andre sekund.

Med tiden ble det utført flere manuelle endringer. Disse er

1. Plassere måleutstyret i borhullet som skal testes
2. Øke radiell størrelse for ytre packer.
3. Fylle seksjon og observasjonsområdet med vann.
4. Fjerne luft fra vannfylt borhull.
5. Øke radiell størrelse for indre packer.
6. Start av injeksjon. Trykk i seksjon øker. Når trykket er på sitt høyeste er vannstrømmen på sitt høyeste. Både vannstrømmen og trykket i seksjonen synker og stagnerer til en konstant verdi
7. Slutt av injeksjon. Avslutter når konstant trykk og konstant vannstrøm er oppnådd
8. Senke radiell størrelse for packere.

I injeksjonsperioden er injeksjonstrykket ment å ha et trykk 500 kPa høyere enn det naturlige formasjonstrykket.

### 7.4. Bestemmelse av formasjonstrykk og injeksjonstrykk

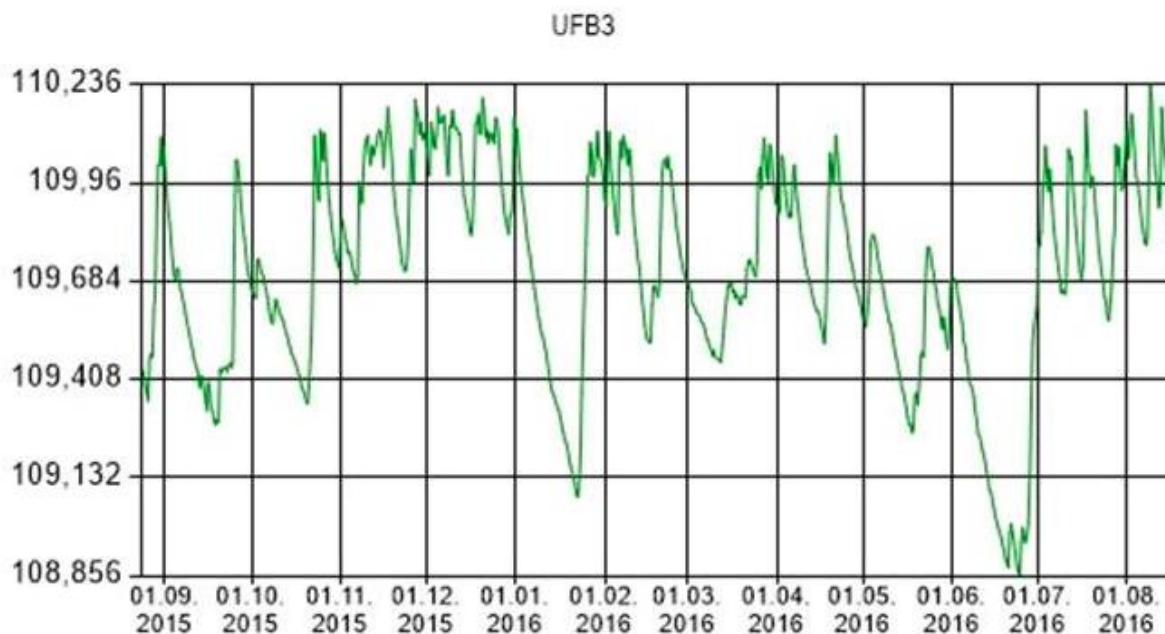
#### 7.4.1. Antatt formasjonstrykk og injeksjonstrykk

En metode for å beregne formasjonstrykket, trykket i berget, er ved å måle trykket i et vannfylt borhull over natten. Det optimale hadde vært å måle tre-fire målinger så nøyaktig som mulig, der målingene gir tilnærmet det samme resultatet. Denne metoden ble ikke gjennomført på en god nok måte.

En annen metode for å beregne formasjonstrykket er ved å vite høyden til grunnvannsøylen  $h$  i forhold til hengt i tunnelen. Da beregnes formasjonstrykket  $p_{\text{berg}}$ , ved bruk av ligning for hydrostatisk trykk, se Ligning 8. Ligning 8 tilsvarer Ligning 1, men her er enkelte parametere byttet om for å ikke skape forvirring med bruk av parametere i kommende ligninger.

$$p_{\text{berg}} = \rho gh \quad \text{Ligning 8}$$

Grunnvannsnivået kan estimeres ved å anta hydrostatiske forhold, da borhullene er plassert et godt stykke inn i berget blir ikke grunnvannet påvirket av helninger i terrenget eller tunnelåpning. Overdekningen der TBM-tunnelen begynner er på ca. 160 m, se Vedlegg 1. Grunnvannsstanden kan da forventes å ligge på et sted mellom 100 og 140 m over tunnelhenget. Figur 38 viser logging av grunnvannshøyde for en brønn i nærheten av borhullene på Arnasiden, se Figur 23 for lokasjon av brønn. Fra figuren er det antatt en grunnvannshøyde på ca. 100 meter over tunnelhenget. Her er 10 meter trukket fra, grunnet høyden til tunnelhenget og tunnellopets beliggenhet over havnivå. Ut ifra Ligning 8 kan in-situ sprekkevannstrykket ( $p_{\text{berg}}$ ) forventes å ligge på ca. 1000kPa. Det ble brukt samme grunnvannsstand for alle borhullene, da de lå i nærhet av hverandre.



**Figur 38: Målinger fra brønn. Første fall i grunnvannshøyde er grunnet oppstart av TBM, januar 2016. Kan lese ut fra diagrammet at grunnvannshøyden var på rundt 110 moh. i brønnen. (Bane Nor, 2016)**

Under pumpeforsøkene bør det pumpes med et trykk  $p_{pump}$  som ligger ca. 500 kPa over in-situ sprekkevannstrykket  $p_{berg}$ . Se Ligning 9.  $\Delta p$  er injeksjonstrykket.

$$\Delta p = p_{pump} - p_{berg} = 500 \text{ kPa} \quad \text{Ligning 9}$$

$\Delta p$  bør helst være konstant for alle målingene i seksjonene. Eksempel: Ved målt in-situ vanntrykk  $p_{berg}$  på 1000 kPa, brukes konstant pumpetrykk  $p_{pump}$  på 1500 kPa. Under det konstante pumpetrykket registreres forløpet av injisert vannstrøm. Når konstant vannstrøm oppnås under pumpingen er pumpeforsøket vellykket.

#### 7.4.2. Egentlig formasjonstrykk og injeksjonstrykk

Under de hydrauliske testene viste det seg at det ikke var grunnvann i borhullene. Situasjonen i borhullene var helt drenert. Ser at hullet ikke er vannmettet, ved å observere null fukt i borhullene før start av målingene. Den drenerte situasjonen kan også ses i bl.a. fremstillingen av målingene for borhull 9 fra sprengt del, se Figur 40. Vannstrømningen har en svakt avtagende kurve, noe som tyder på null bakgrunnstrykk, siden det ikke var grunnvann tilstede. Med bakgrunnstrykk menes trykket i berget  $p_{berg}$ . Grunnen til det lave bakgrunnstrykket er sannsynligvis at borhullene ikke ble boret langt nok inn til å møte på grunnvannet. Ved dypere borhull kan en forvente at formasjonstrykket hadde vært på 1000 kPa som antatt. Isteden ble trykket bestemt til å være lik lufttrykket  $p_{air}$ .

Utstyret som målte trykket i seksjonen  $p_{sect}$  målte i absolutt trykk. Ved å trekke fra lufttrykket  $p_{air}$  får en injeksjonstrykk  $\Delta p$  ved bruk av Ligning 10.

$$\Delta p = p_{sect} - p_{air} \quad \text{Ligning 10}$$

## 7.5. Feilkilder

Det er flere mulige feilkilder under de hydrauliske testene som ble gjennomført i Arna. En av de mulige feilkildene er at sprekker kan gi vannføring forbi packerne. Om det er et nettverk av sprekker i seksjonen som er koblet til sprekker utenfor seksjonen, kan vannet strømme gjennom sprekke og over på den andre siden av packeren.

Om det lekker fra et nabohull indikerer det at transmissivitetsverdiene kan bli overvurdert og ikke representativ for de hydrauliske egenskapene til den testede delen, muligens på grunn av sammenkoblede sprekker.

Packerne burde egentlig plasseres minimum 10cm fra sprøytebetongoverflaten. Ved flere tilfeller ble ikke dette gjort. Om mansjetten beveger seg under målingene, kan det bli målt i grensesjiktet mellom sprøytebetong og bergoverflate.

Flere steder var vanntanken litt for liten, slik at den måtte fylles i flere omganger. Noe som øker sannsynligheten for feilmålinger.

Maksgrense for registrering av vannstrømningen er på 1,79771 liter/minutt. Ved flere tilfeller overskred vannstrømningen denne verdien. Verdien ble da ikke målt til sin egentlige verdi.

Injeksjonstrykket  $\Delta p$  burde egentlig være det samme for alle borhullene, ved målingene varierer trykket mye fra borhull til borhull

Valget av borhull som blir testet er ikke helt representativt. Mange parametere som spilte inn under valg av borhull.

## 8. Resultater av hydrauliske målinger

Hydrauliske målinger ble tatt i valgte borhull på Arna-siden. I Tabell 5- Tabell 12, som viser resultater for de hydrauliske målingene, representerer røde rader verdier som ikke ga gyldige målinger. Vannstrømmen og trykket blir vist mot tiden i grafer. Ved fremstillingen av målingene i grafene er det valgt fra registreringen av injeksjonstart i csv-filene. Dette tilsvarer Punkt 6 i delkapittelet 7.3.Fremgangsmåte. Noen av grafene kan se flate ut siden de ikke har en høyere verdi for vannstrøm i starten, dette kan være grunnet registreringen i tunnelen. Registrering av injeksjonstart kan ha blitt markert i csv-filen senere. Figur 69 viser en ideell "bue" for vannstrøm i en seksjon for borhull 23.

Alle seksjonene er benevnt for avstand fra bergoverflaten, dvs. sprøytebetongmektigheten er trukket fra. Trykket i seksjonene som er angitt i tabellene og grafene er gitt i absolutt trykk Gyldige målinger er lagt ved som figurer, mens målinger som ikke kan brukes til å beregne transmissiviteten er lagt ved som vedlegg ved noen tilfeller.

### 8.1. Hydrauliske målinger for borhull 9

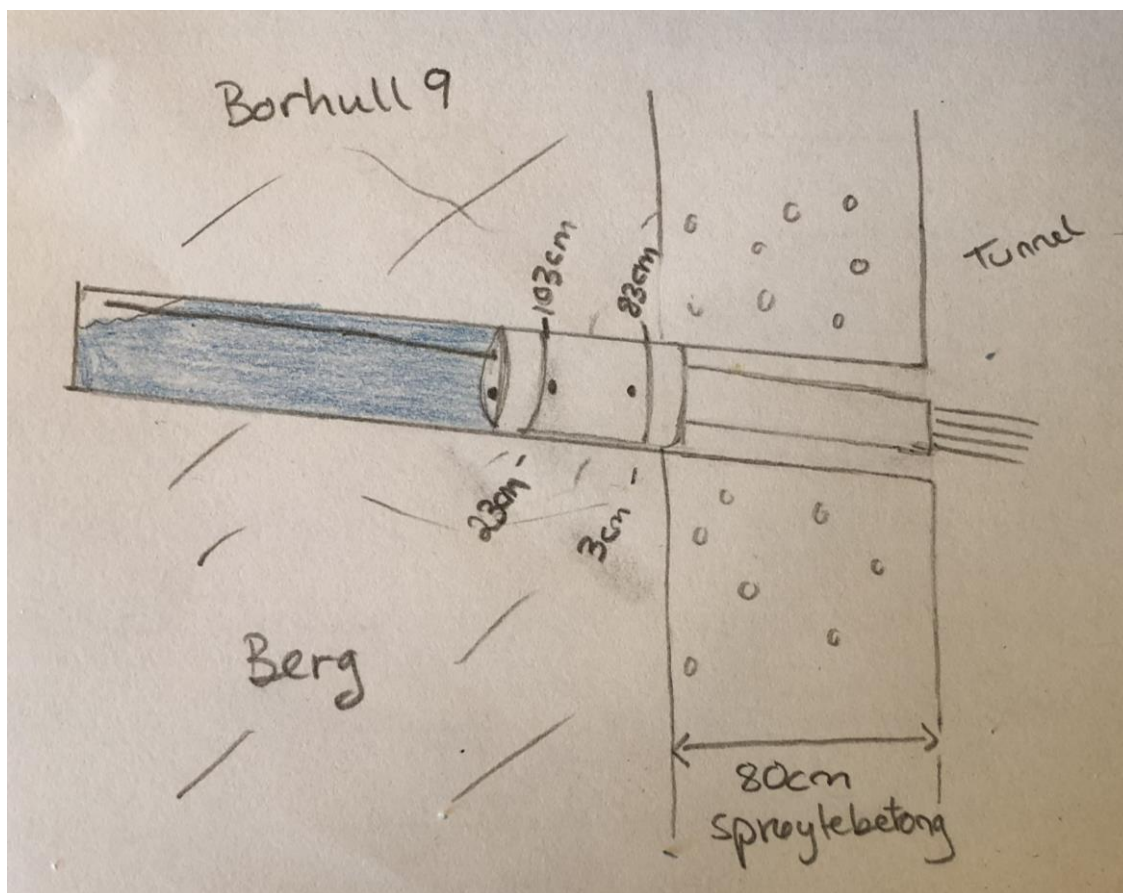
Sprøytebetongtykkelsen var på 80cm for borhull 9. Den ytterste packeren ble satt 83cm inn for å unngå at vannet skulle strømme i laget mellom sprøytebetong og berg, se Figur 39. Da ville vannstrømningen ha blitt målt for feil område. En sikkerhetsmargin på 3cm er egentlig ikke stor nok, burde vært på 10cm for å sikre seg mot glidning av mansjetten slik at en måler i



grensesjiktet mellom sprøytebetong og bergoverflate. Ved å ha en minimumsmargin på 10cm sikrer man seg også mot feilmålinger av sprøytebetongtykkelsen.

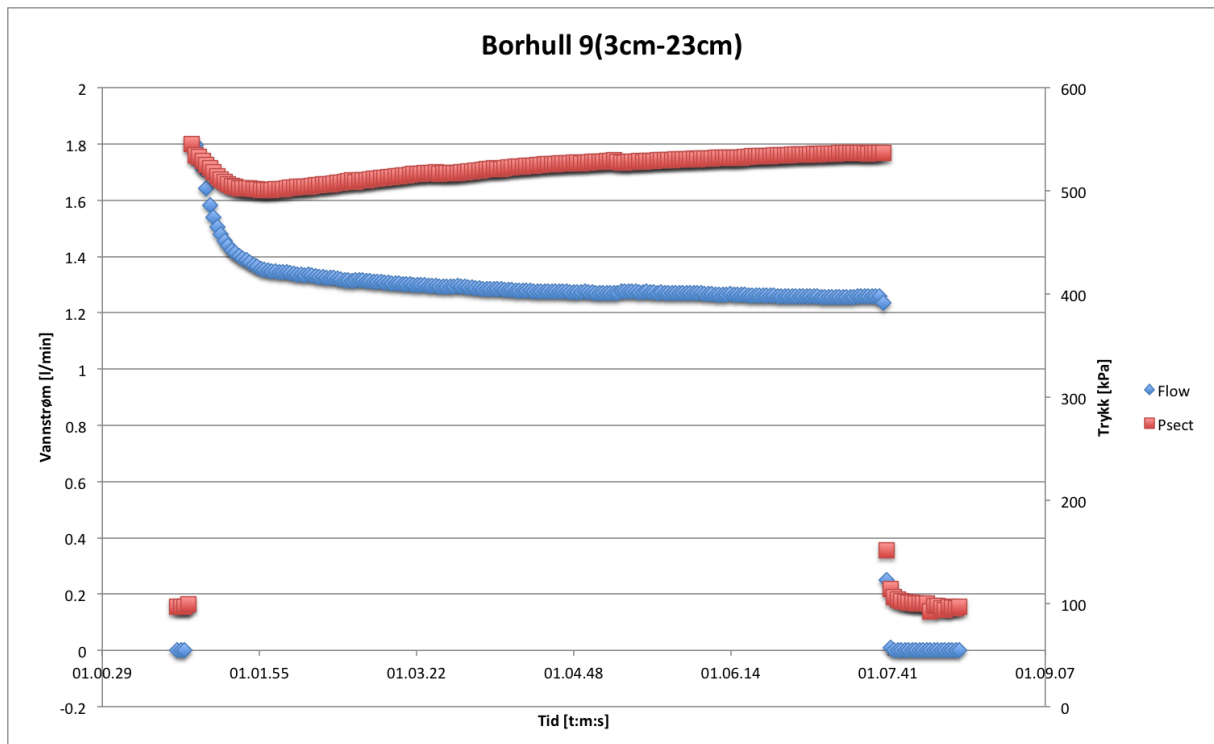
**Tabell 5: Hydrauliske målinger for borhull 9**

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
3-23	1,25 l/min	520	Oppnår ikke konstant trykk. Ble testet tre ganger.	Se Figur 40
23-160			Når maks vannstrømning og trykket faller. Ikke stasjonære verdier. Avbryter etter to forsøk. Lekker vann ut av borhull 8.	Se Figur 41

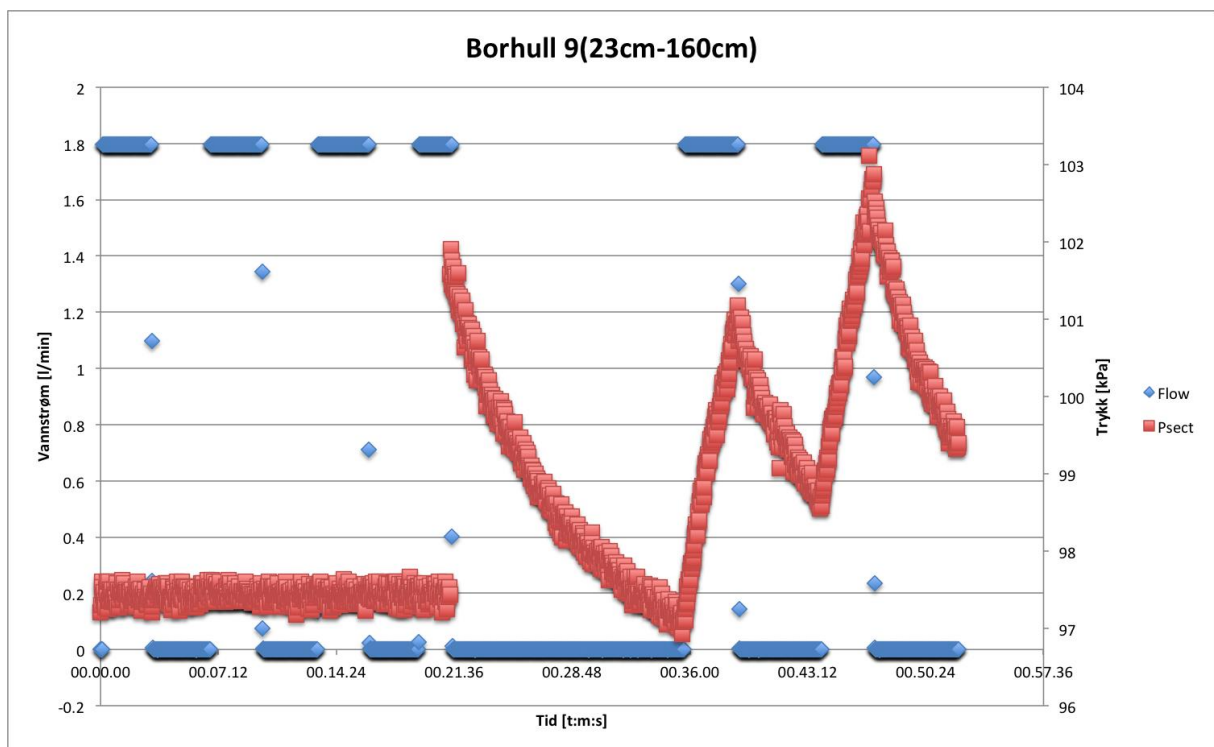


**Figur 39: Skisse av måling for borhull 9. Seksjonen er 83cm-103cm fra sprøytebetongoverflaten. Det vil si: seksjonen er 3cm-23cm inn i berget. På skissen er vann ført inn i observasjonsområdet og luft pumpes ut.**

Under testen, hvor vann ble fylt i observasjonsområdet, gikk mye av vannet ut til borhull 8. Dette kan forklares med at det er kobling mellom sprekkene i borhull 8 og borhull 9. Ser av borkjerneloggingen for borhull 8 (Vedlegg 9) og borkjerneloggingen for borhull 9 (Figur 42) at begge kjernene har en oppsprukket sone i sonen i umiddelbar nærhet av bergoverflaten. Ser av borkjerneloggingen at kjernen er kraftig oppsprukket i seksjon 3cm-23cm, den høye vannstrømningen i seksjonen gir mening. I den innerste seksjonen, 23cm-160cm, ble det forsøkt å ikke fylle observasjonsområdet, med kun fylle seksjonen med vann. Det lakk fortsatt.



Figur 40: Borhull 9, 3cm-23cm fra bergoverflaten.



Figur 41: Borhull 9, 23cm-160cm fra bergoverflaten. Får ingen gyldig verdi, grunnet maks vannstrøm og trykkfall.



Figur 42: Borkjernelogging for borhull 9. Høy vannstrøm i oppsprukket sone.

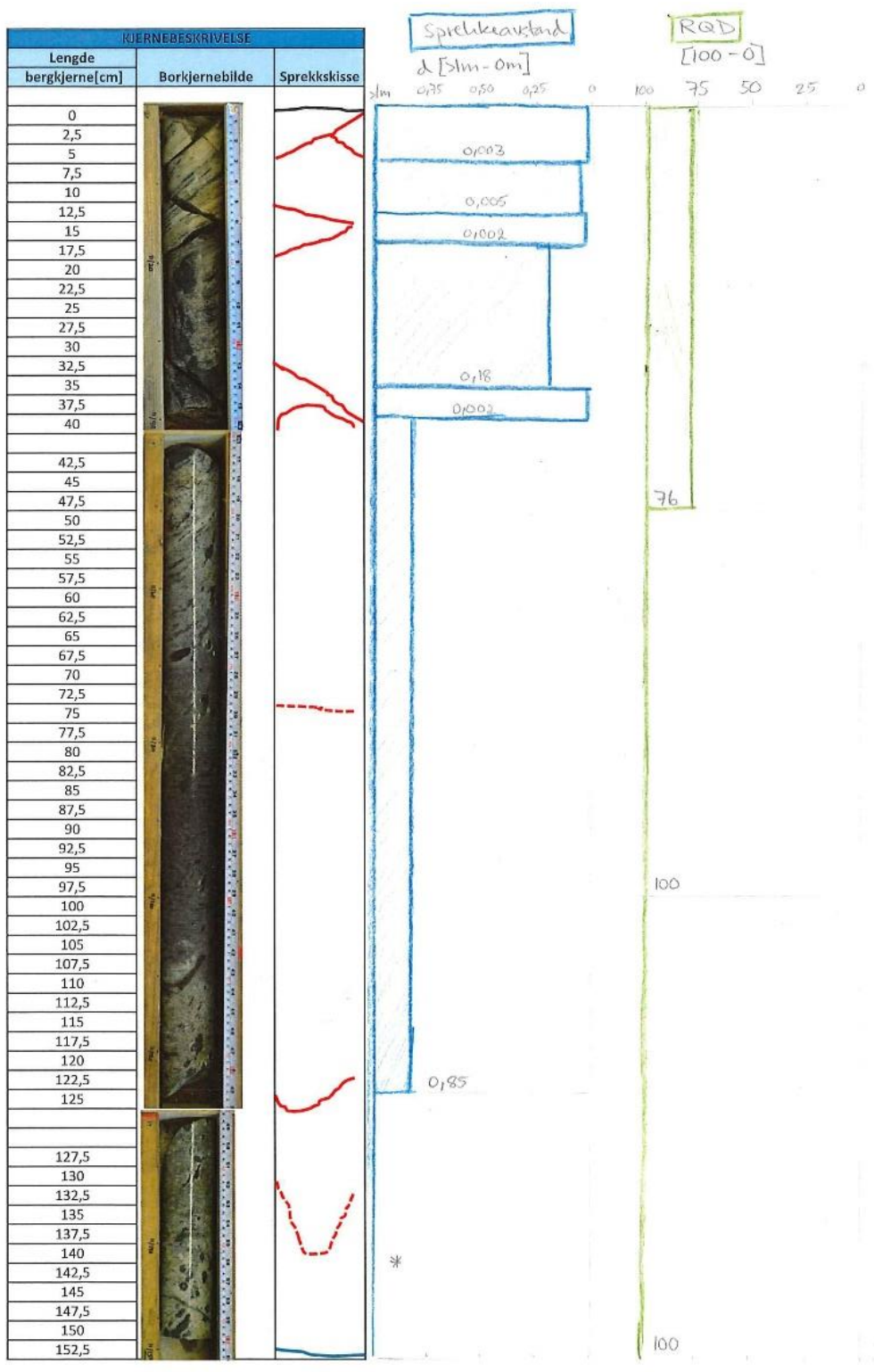
## 8.2. Hydrauliske målinger for borchull 11

Ble tatt målinger i to seksjoner. Ingen av målingene ble gyldige, da vannstrømmen var høyere enn maksverdien som blir målt av utstyret. Dette gjorde at trykket heller ikke holdt seg konstant.

**Tabell 6** Hydrauliske målinger for borchull 11

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
4-24	-	-	Når ikke konstant trykk og får maks vannstrøm. Forsøker tre ganger.	Se Vedlegg 26
24-154	-	-	Når ikke konstant trykk og får maks vannstrøm. Lekker ut av hullet	Se Vedlegg 27

Forklaringen på at maks vannstrøm ble oppnådd kan en se ved den oppsprukkede sonen i umiddelbar nærhet av bergoverflaten i borkjerneloggingen for borchull 11, se Figur43.



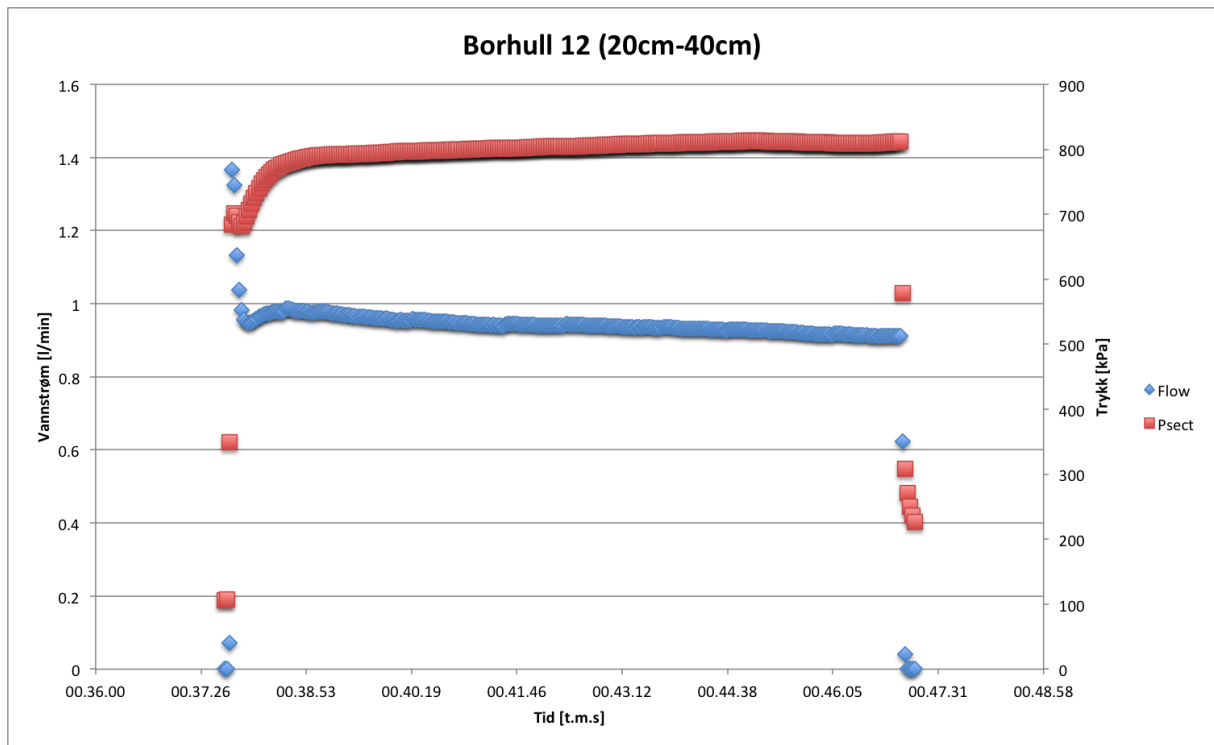
Figur 43: Borkjærnelogging for borhull 11. Problemene med maks vannstrøm kan skyldes oppsprukket sone.

### 8.3. Hydrauliske målinger for borhull 12

Tabell 7 Hydrauliske målinger for borhull 12

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
0-20			Får ikke konstant trykk og får maks vannstrømning. Tester tre ganger.	Se Vedlegg 28
20-40	0.9 l/min	790	Trykket er ikke helt stasjonært.	Se Figur 44
40-173			Trykk veksler under målingen	Se Vedlegg 29

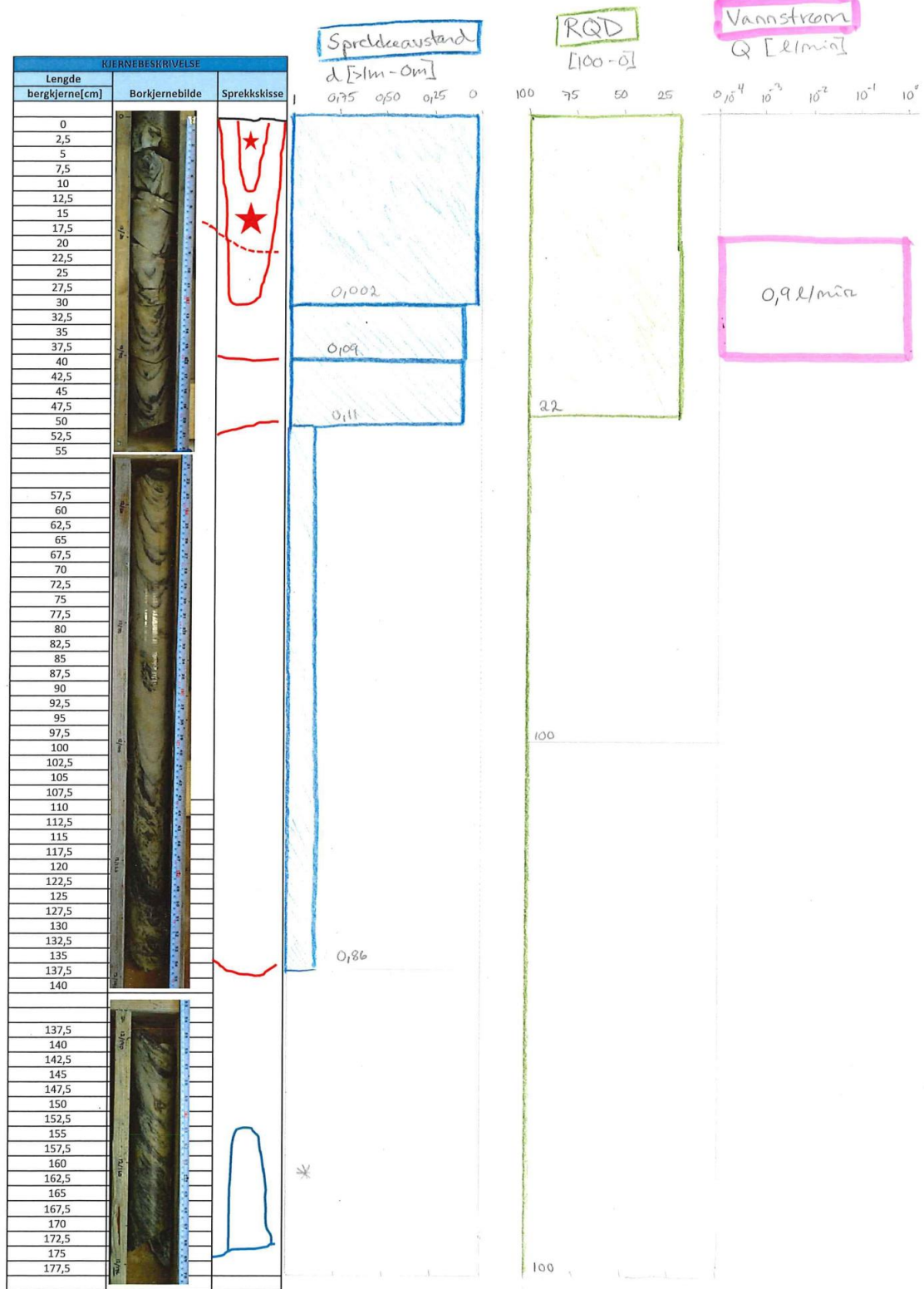
Første seksjon for borhull 12 har høy grad av oppsprukkenhet, dette kan være grunnen til problemene med maks vannstrøm. Figur 45 viser sprengningsskadesone for seksjon i umiddelbar nærhet til bergoverflaten.



Figur 44: Borhull 12, 20cm-40cm fra bergoverflaten.



12



Figur 45 Borkjernelogging for borhull 12. Høy vannstrøm i oppsprukket sone. Problemene med maks vannstrøm for de andre seksjonene kan skyldes oppsprukket sone.

## 8.4. Hydrauliske målinger for borhull 13

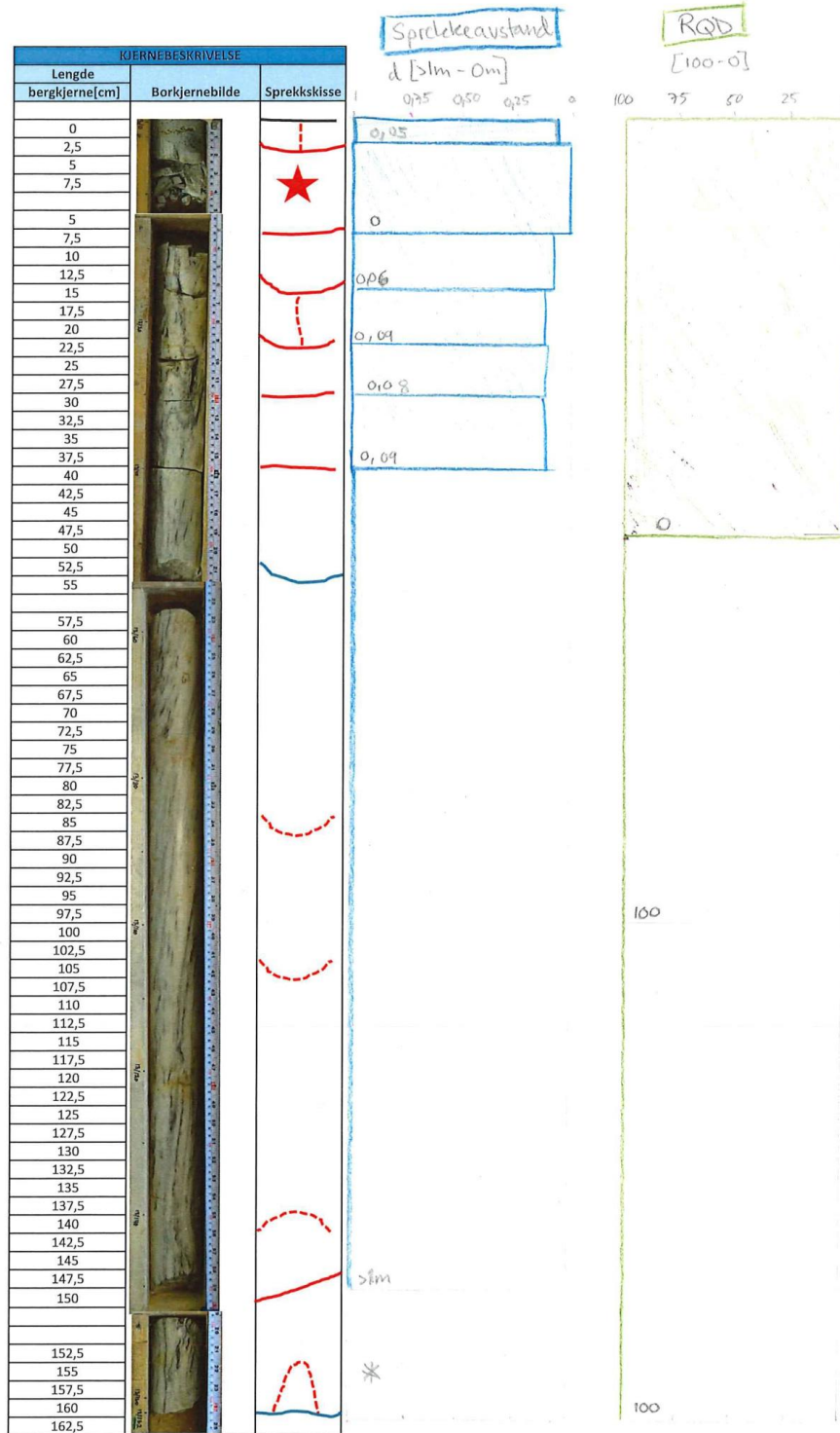
Tabell 8: Hydrauliske målinger for borhull 13

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
86-106			Kan ikke fylle observasjonsområdet, tvunget til å flytte seksjon. Mangler fil.	
95-115			Kan ikke fylle seksjon. Mangler fil.	
112-240			Vannet rennet ut av hullet. Problem med trykket. Mangler fil.	

Problemene under testene av borhull 13 kan forklares med sprengningsskadesonen som ses i Figur 47. Veldig oppsprukket i ytterste seksjon.



13



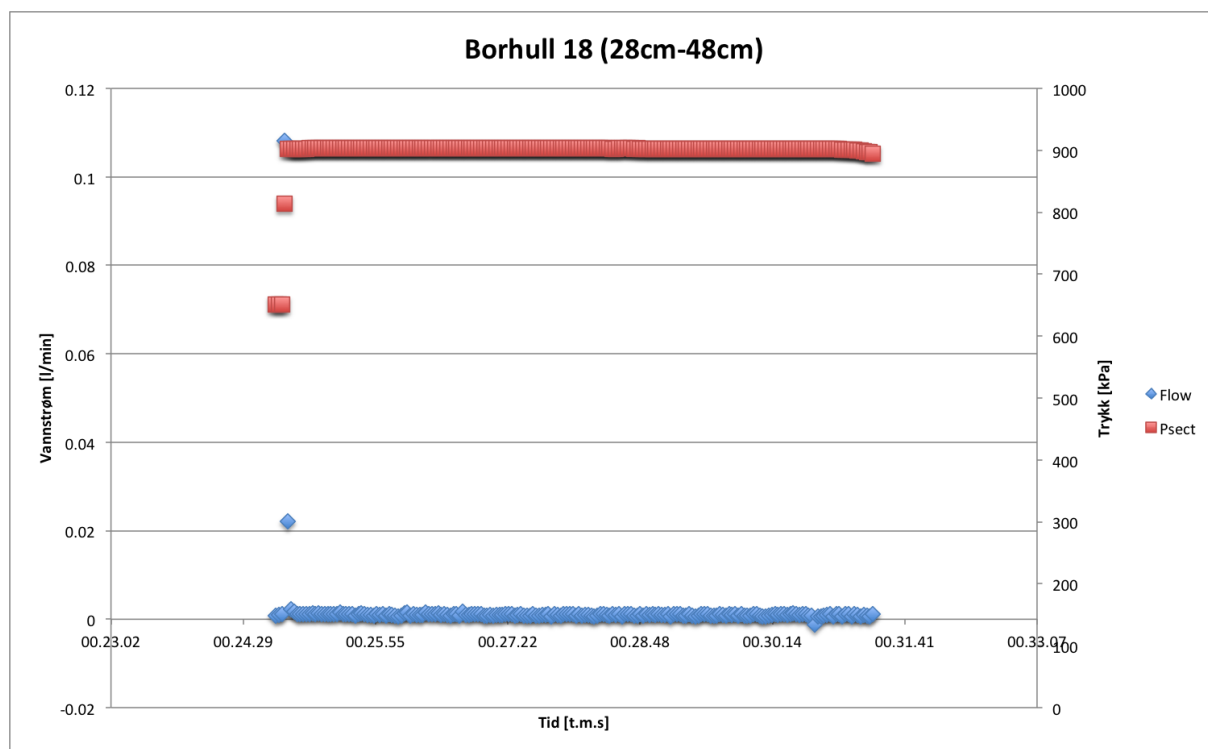
Figur 46: Borkjerne logging for borhull 13. Problemene under målingene kan skyldes oppsprukket sone

## 8.5. Hydrauliske målinger for borhull 18

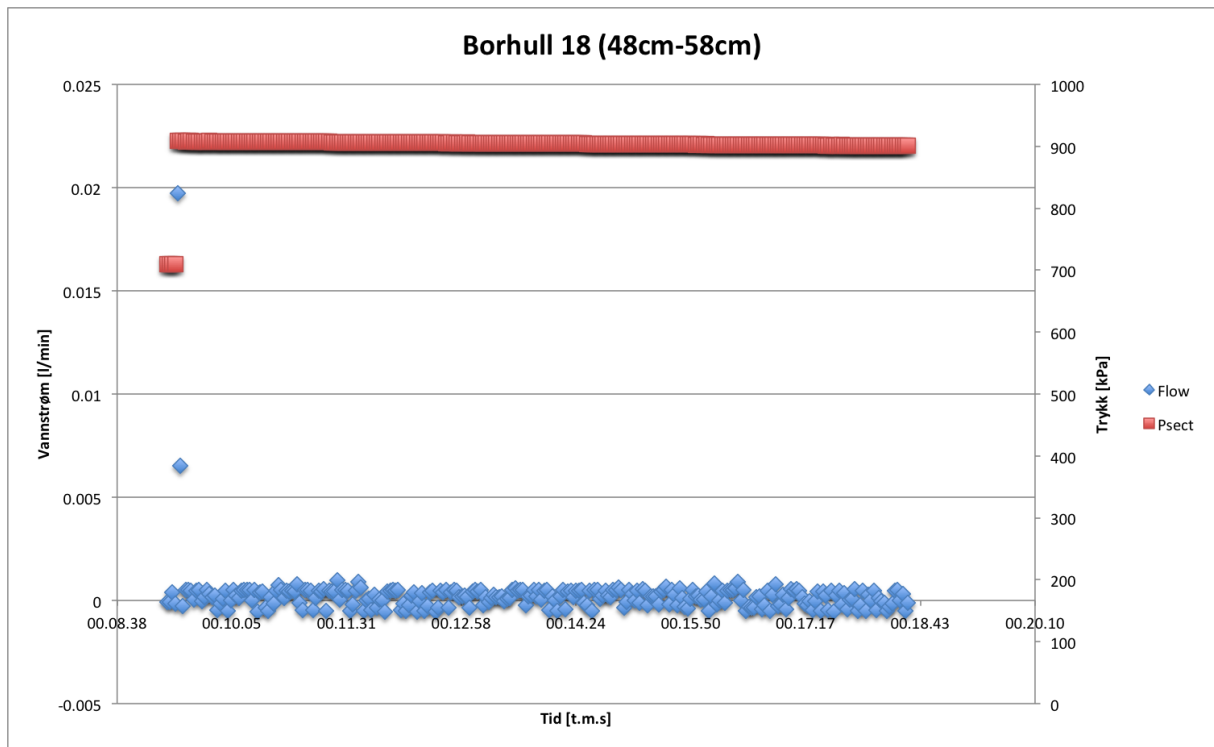
Tabell 9: Hydrauliske målinger for borhull 18

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
8-28	0,0045	926	Mansjetten beveger seg ca. 1cm	Se vedlegg 30
18-38	-	-	Mansjetten beveger seg ut	Se vedlegg 31
28-48	0,001	903		Se Figur 47
38-58			Ikke konstant trykk og mansjetten kommer ut	Se vedlegg 32
48-58	0,000	900-905	Tett	Se Figur 48
48-68	0,0005	914-921		Se Figur 49
68-88	0,005	903-904		Se Figur 50
88-159	0,002	914-917		Se Figur 51

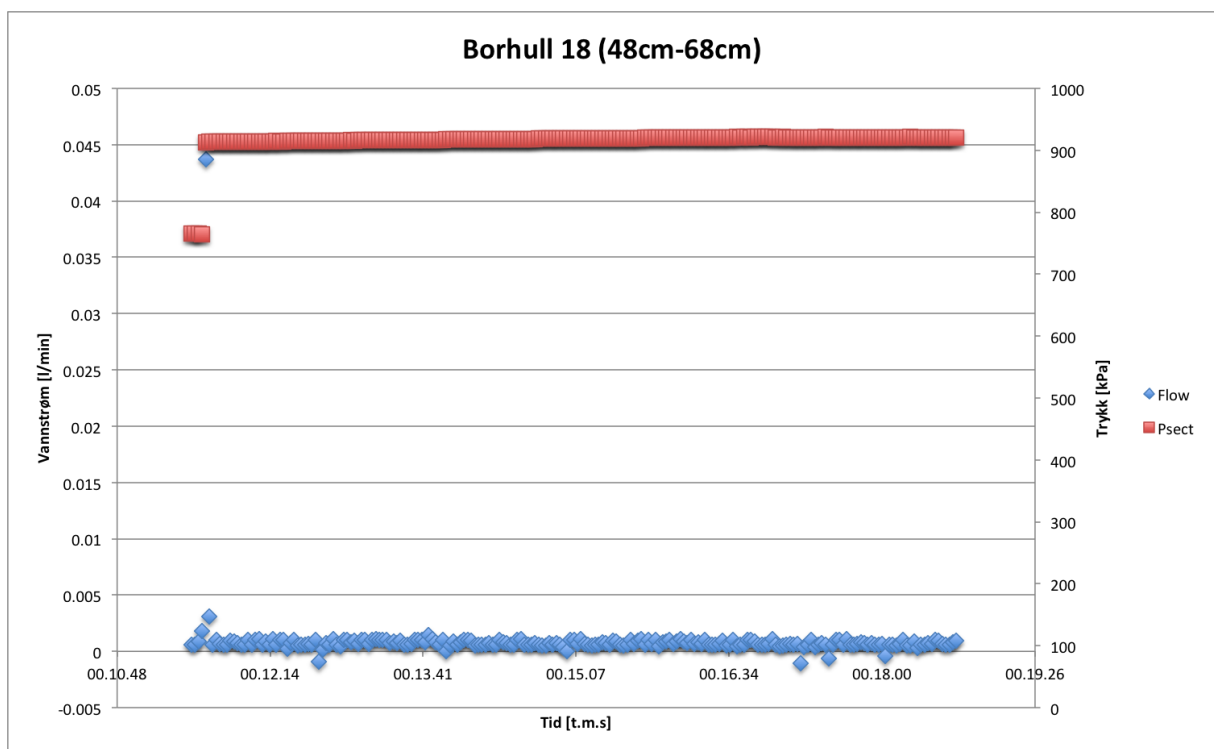
Ser av borkjerneloggingen at vannstrømmen er høyere for sonene med kartlagt sprekk. Den innerste sonen har en vannstrøm som kan skyldes små sprekker som ikke ble kartlagt under borkjerneloggingen eller feilmåling. Se Figur 52.



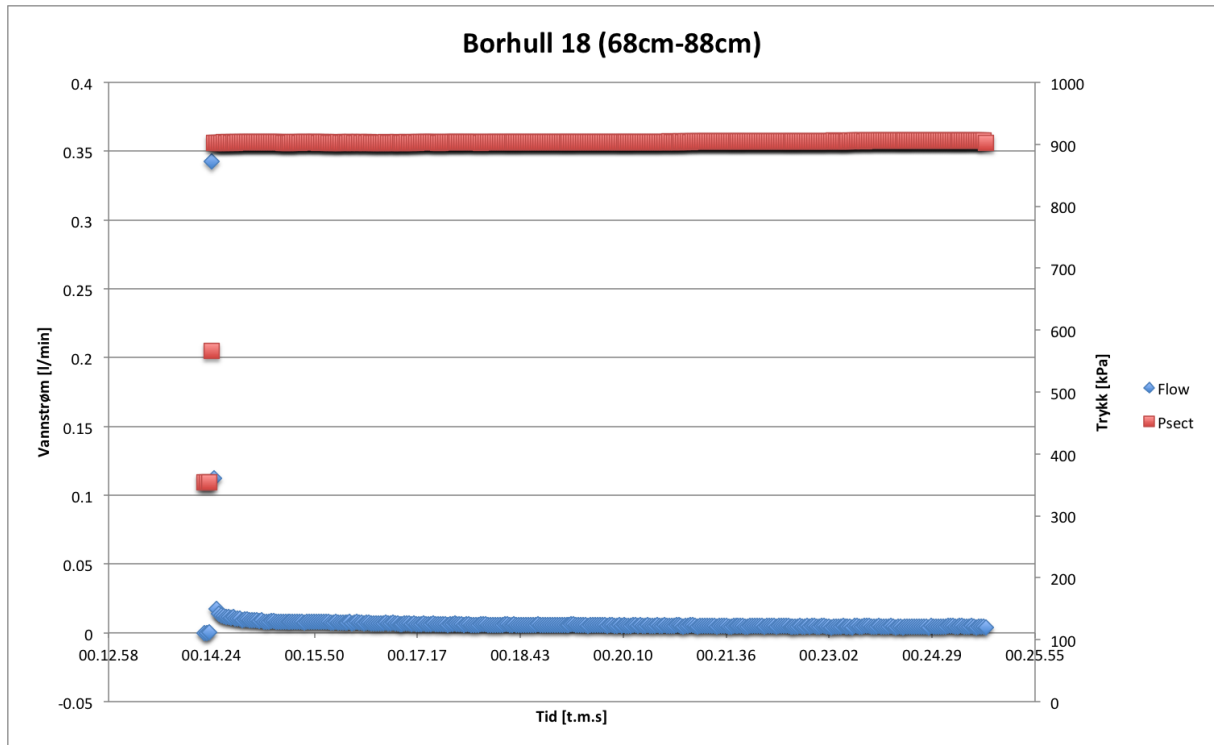
Figur 47: Borhull 18, 28cm-48cm fra bergoverflaten.



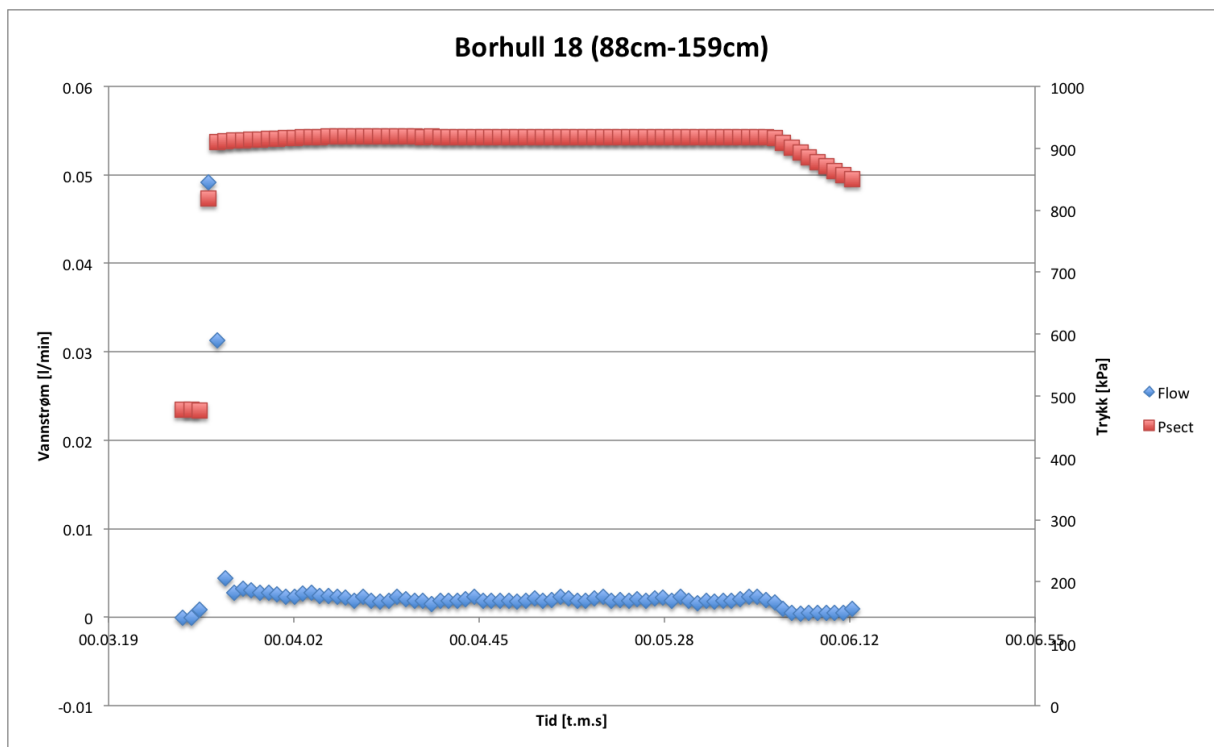
**Figur 48: Borhull 18, 48cm-58cm fra bergoverflaten.**



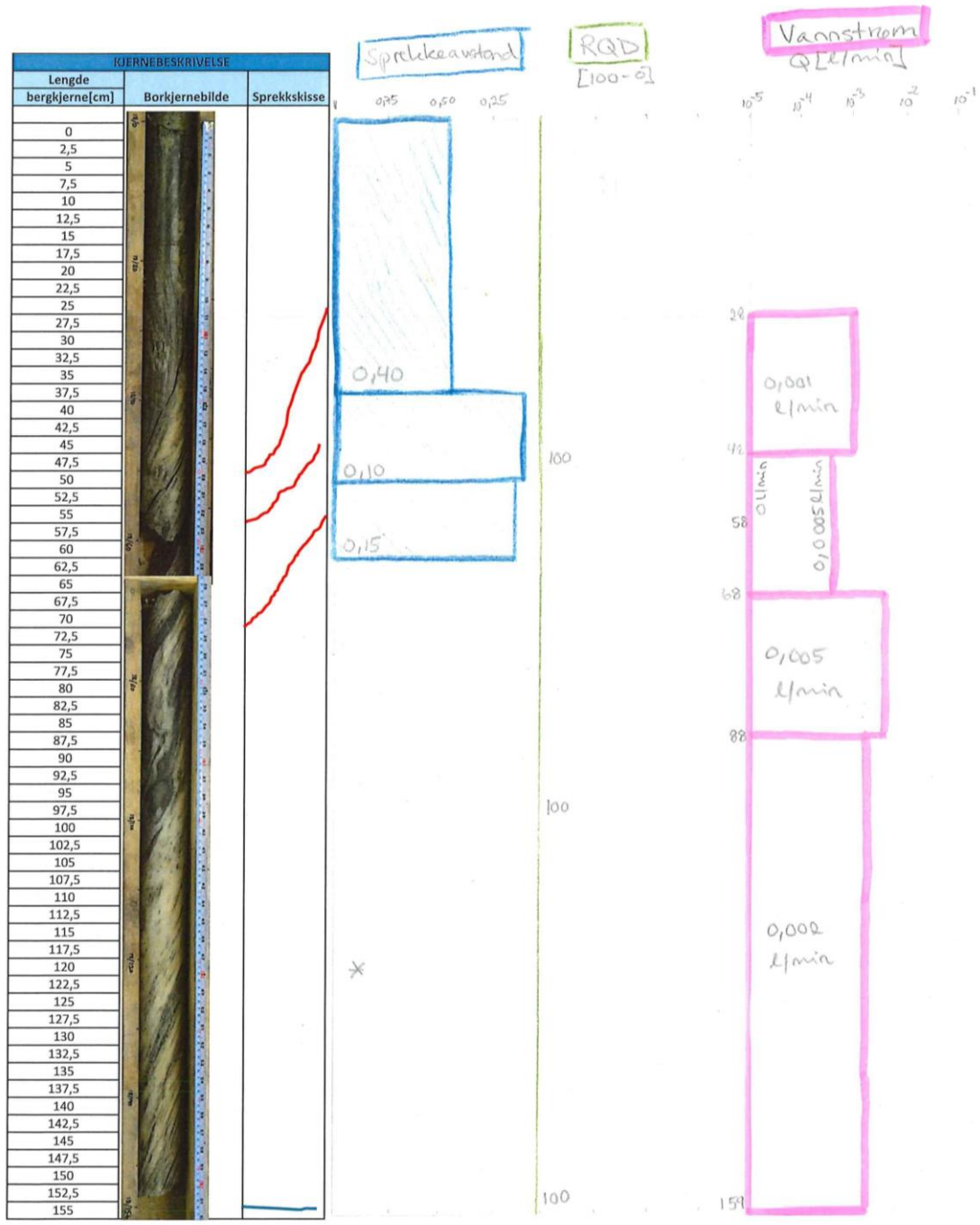
**Figur 49: Borhull 18, 48cm-68cm fra bergoverflaten.**



**Figur 50: Borhull 18, 68cm-88cm fra bergoverflaten.**



**Figur 51: Borhull 18, 88cm-159cm fra bergoverflaten.**



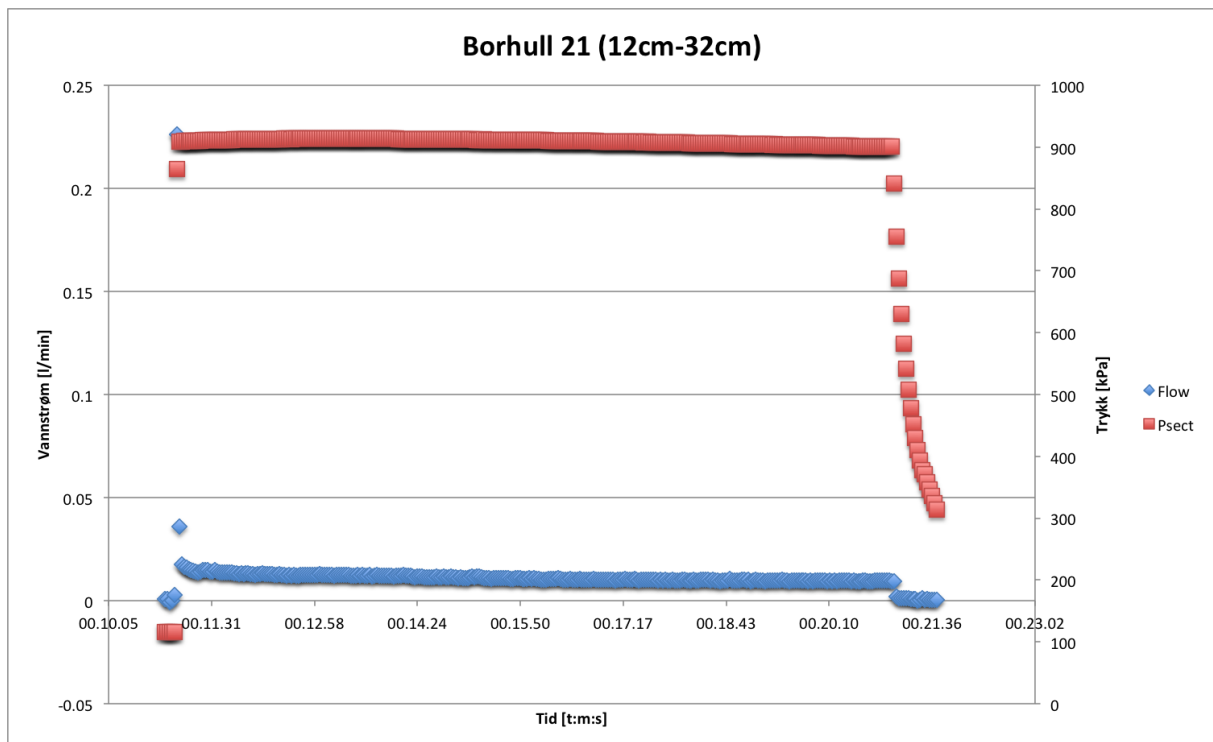
Figur 52: Borkjerne logging for borhull 18. Høyere vannstrøm i soner med sprekker.

## 8.6. Hydrauliske målinger for borhull 21

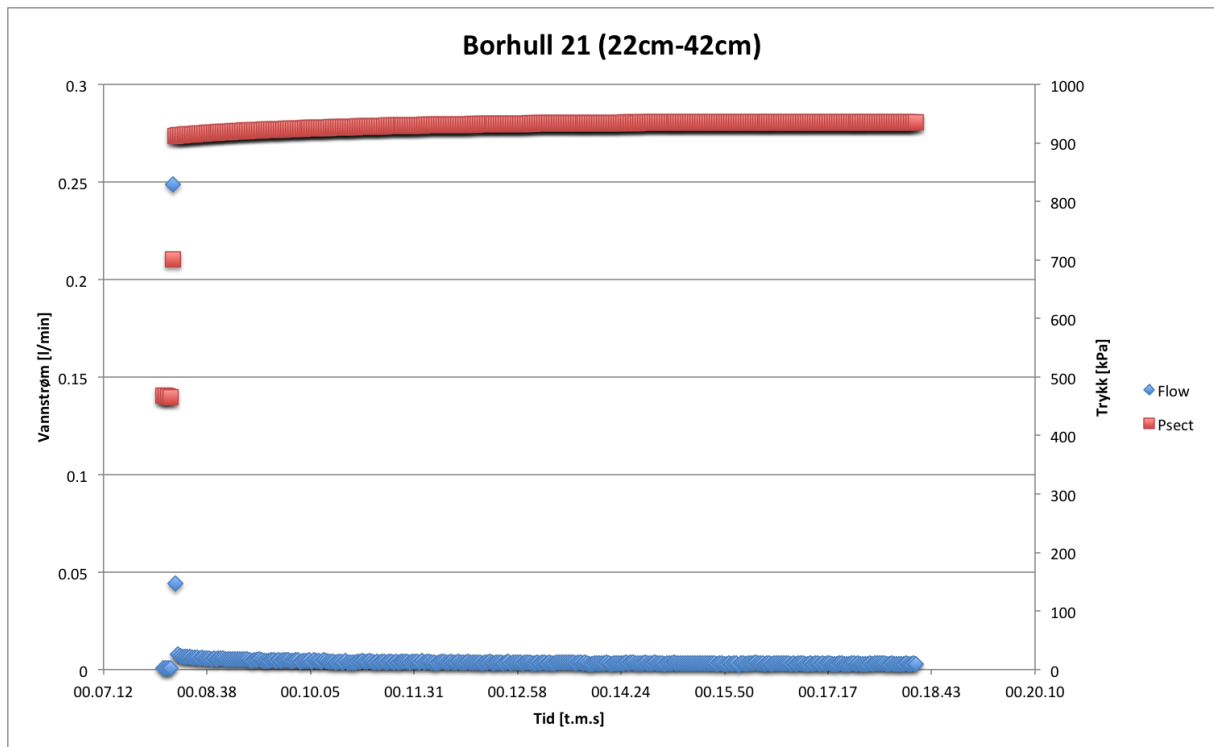
Tabell 10: Hydrauliske målinger for borhull 21

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
12-32	0,011	911	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 53
22-42	0,004	932	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 54
32-52	0,014	890	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 55
42-62	0,007	920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 56
52-72	0,002	930	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 57
72-82	0,001	920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 58
72-92	0,008	920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 59
92-158	0,023	910	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 60

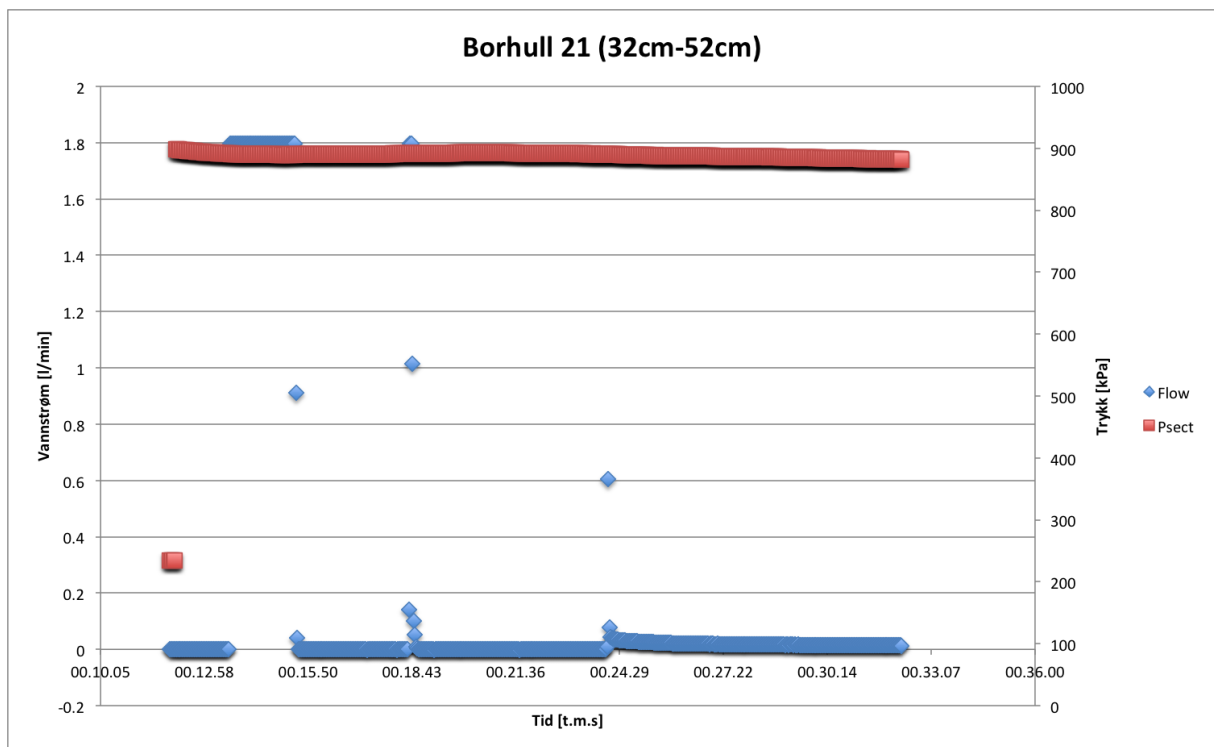
Figur 61, viser fremstillingen av borhull 21 mot de hydrauliske målingene. Sprekker er kartlagt i soner hvor vann strømmer.



Figur 53: Borhull 21, 12cm-32cm fra bergoverflaten.



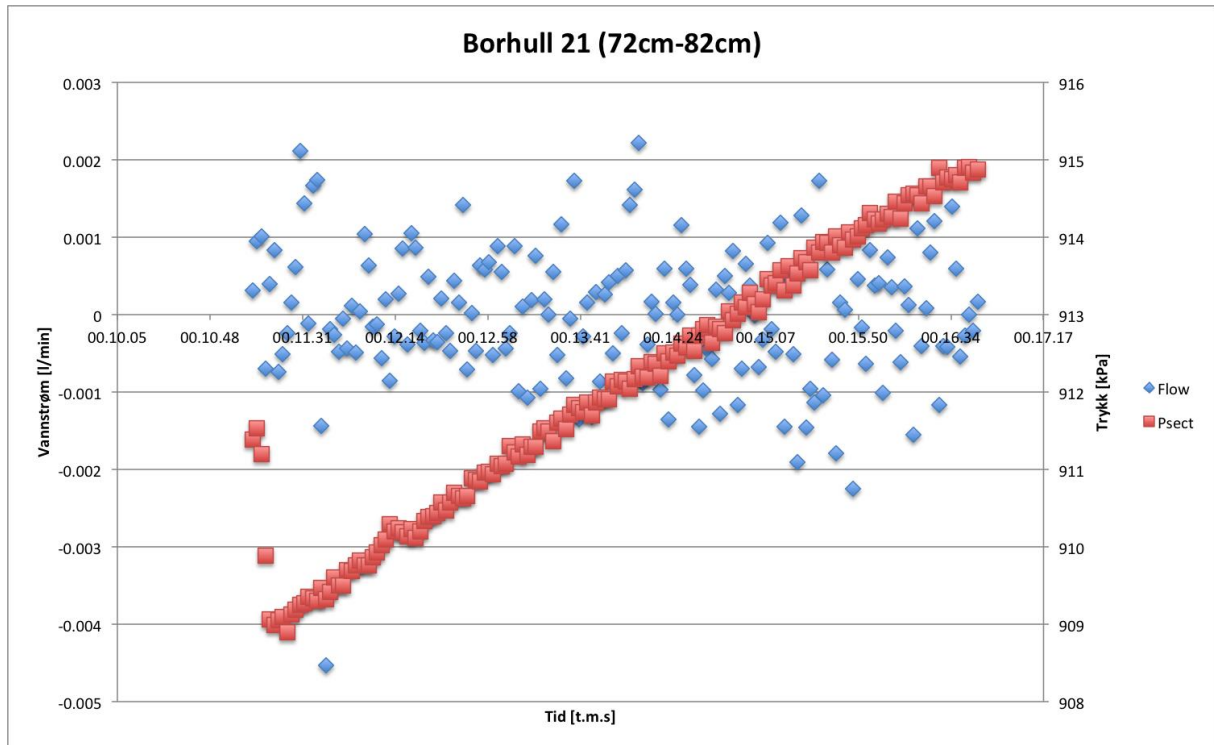
Figur 54: Borhull 21, 22cm-42cm fra bergoverflaten.



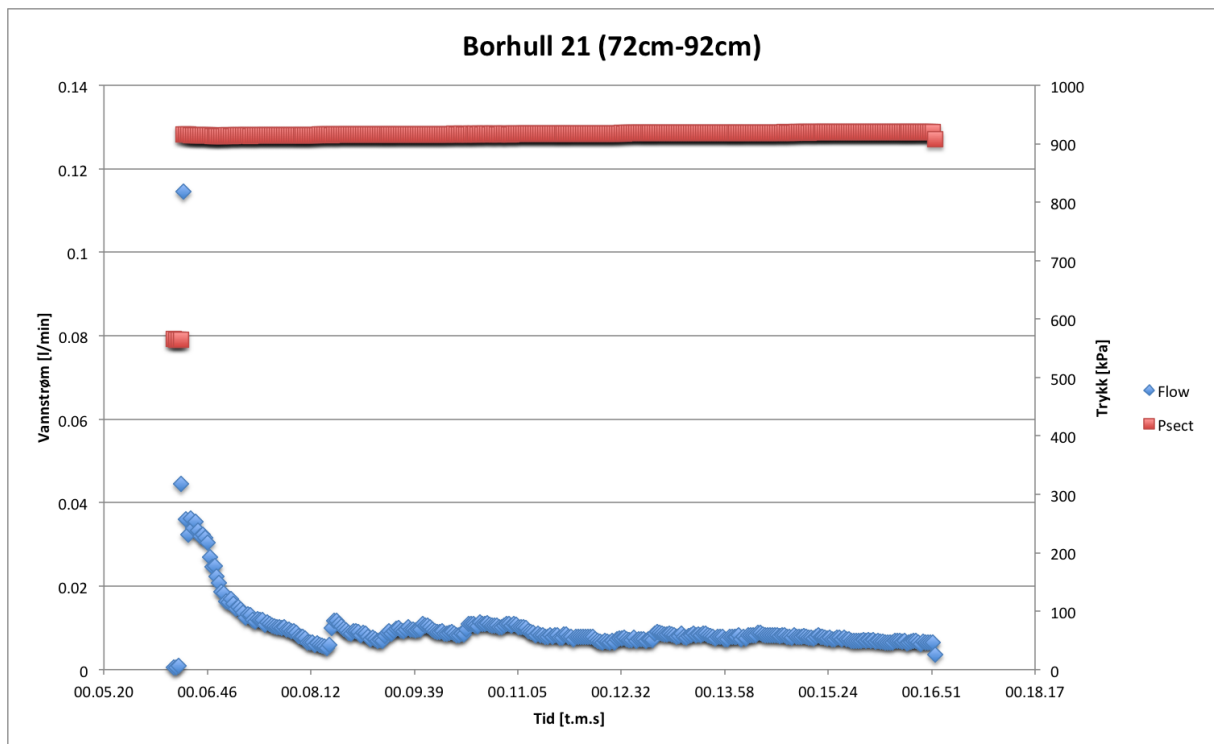
Figur 55: Borhull 21, 32cm-52cm fra bergoverflaten.



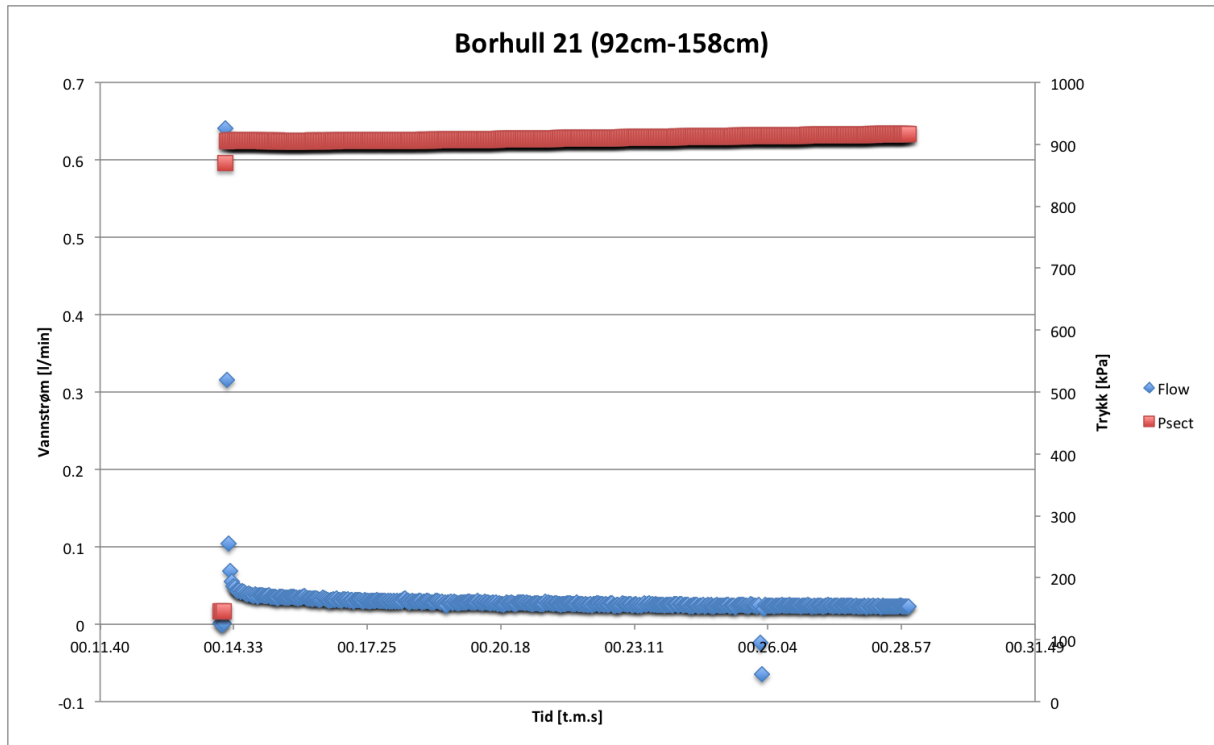




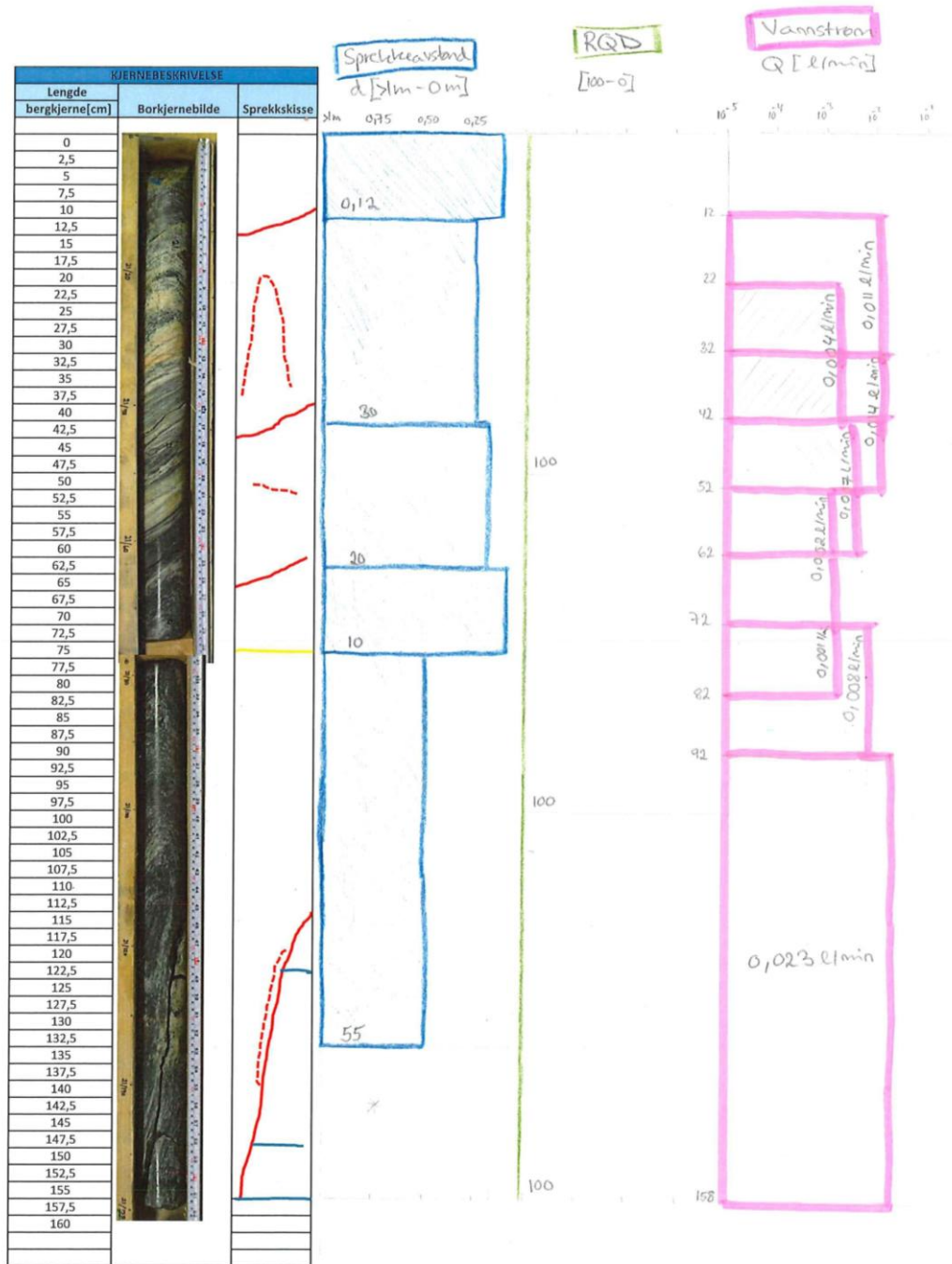
**Figur 58: Borhull 21, 72cm-82cm fra bergoverflaten. Grunnen til at trykket har et visuelt høyt stigningstall er at injeksjonsperioden har et kort tidsintervall og at y-aksen for trykk har korte intervaller.**



**Figur 59: Borhull 21, 72cm-92cm fra bergoverflaten.**



**Figur 60: Borhull 21, 92cm-158cm fra bergoverflaten.**



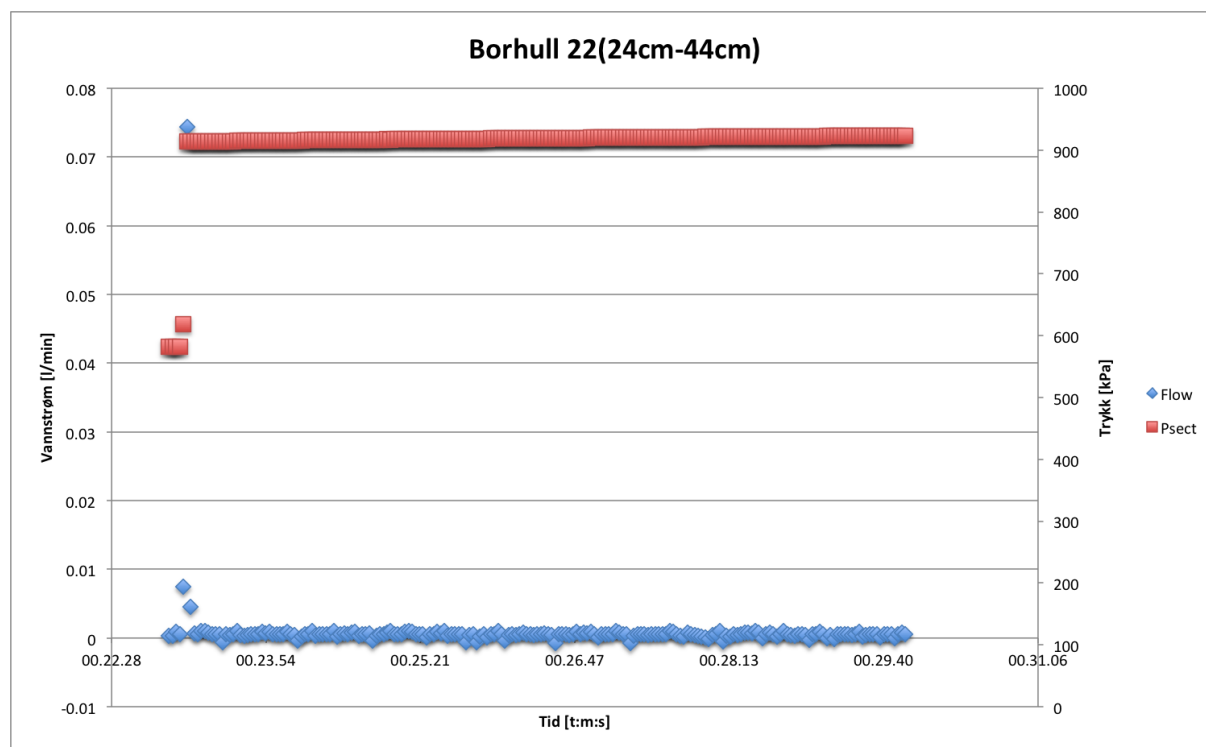
Figur 61: Borkjerne logging for borhull 21

## 8.7. Hydrauliske målinger for borhull 22

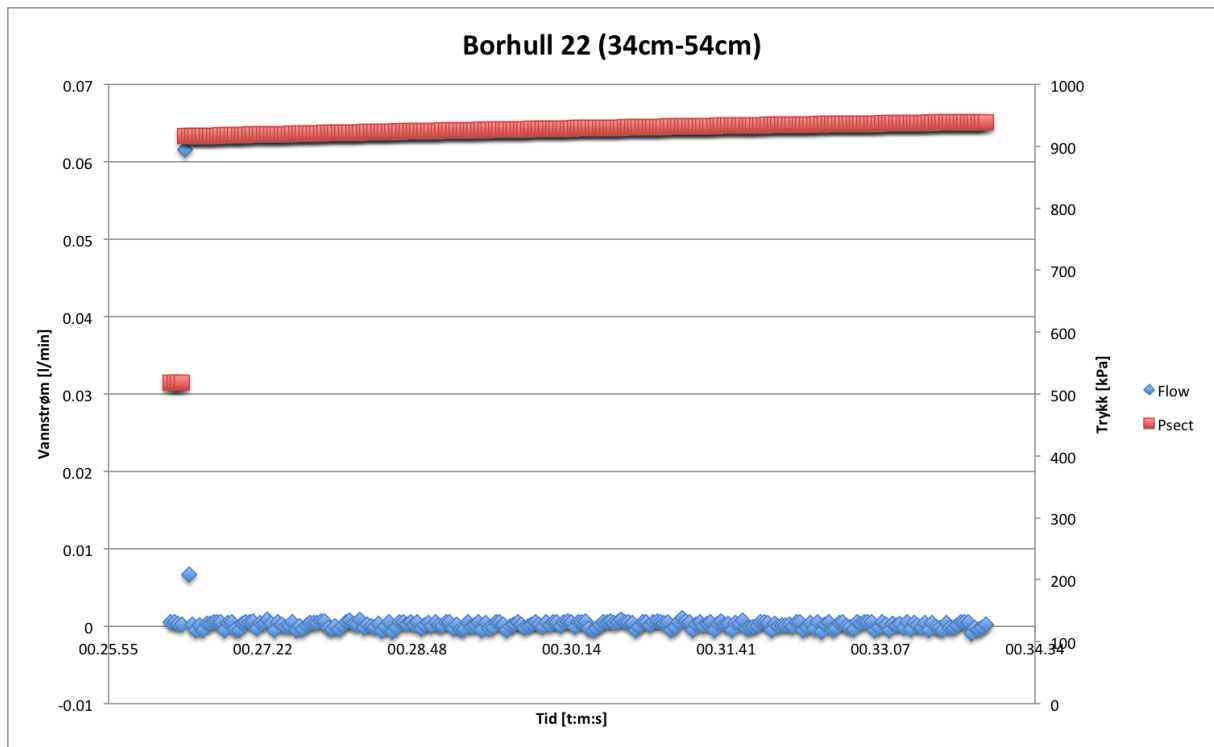
Tabell 11: Hydrauliske målinger for borhull 22

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
14-34	0,011	880	Lekker mot observasjonsområdet og mansjetten beveger seg. Ugyldig	Se vedlegg 33
24-44	0,0005	918	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se
34-54	0	920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur
44-64	0,0005	910-930	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur
54-74	0	910-930	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 62
74-94	0,0005	907-920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 63
94-150	0,002	910-920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 64

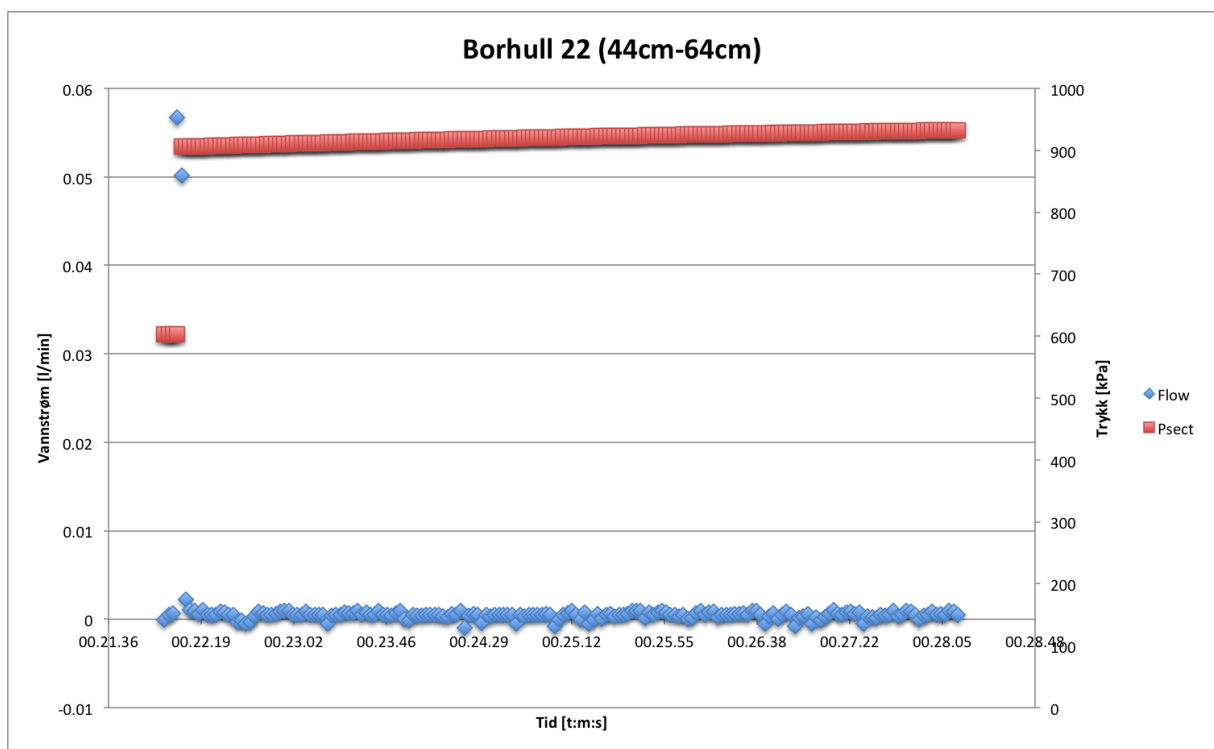
Målingene av vannstrøm i seksjon 24cm-44cm uten kartlagt sprekke, kan være grunnet feil i målingen eller feil i kartleggingen. Er dog en lav verdi for vannstrøm. Se Figur 68.



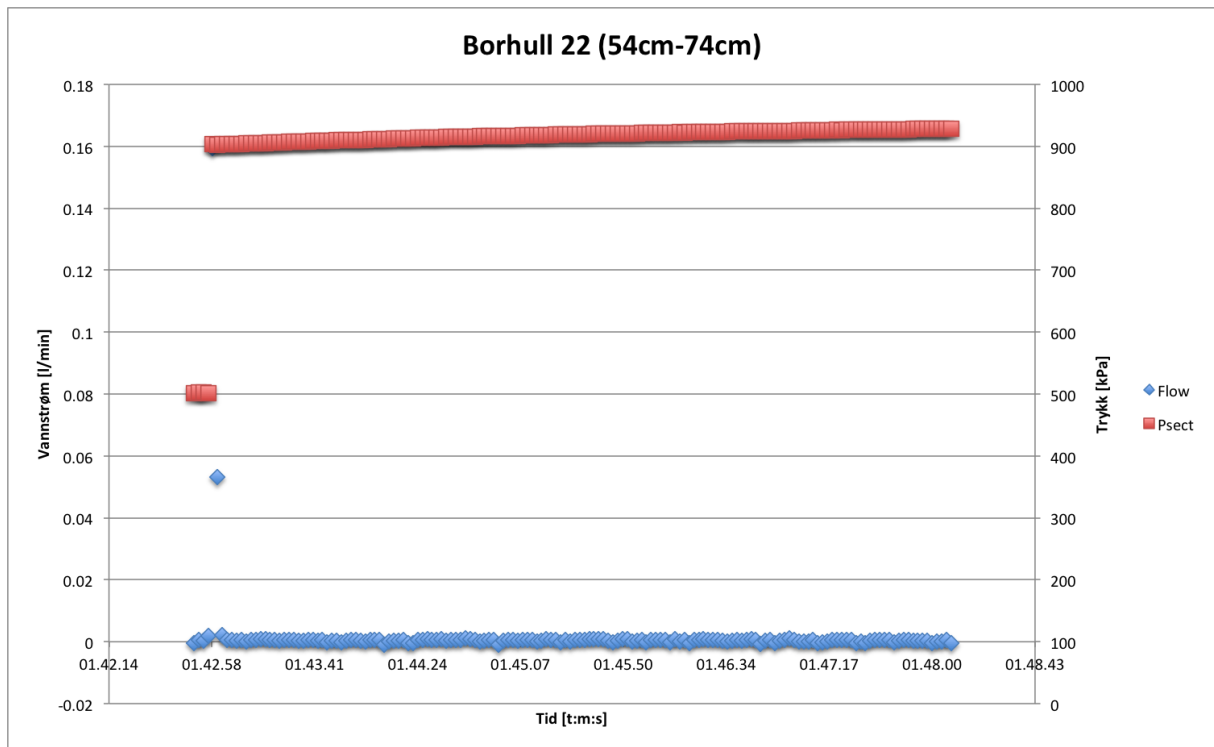
Figur 61: Borhull 22, 24cm-44cm fra bergoverflaten.



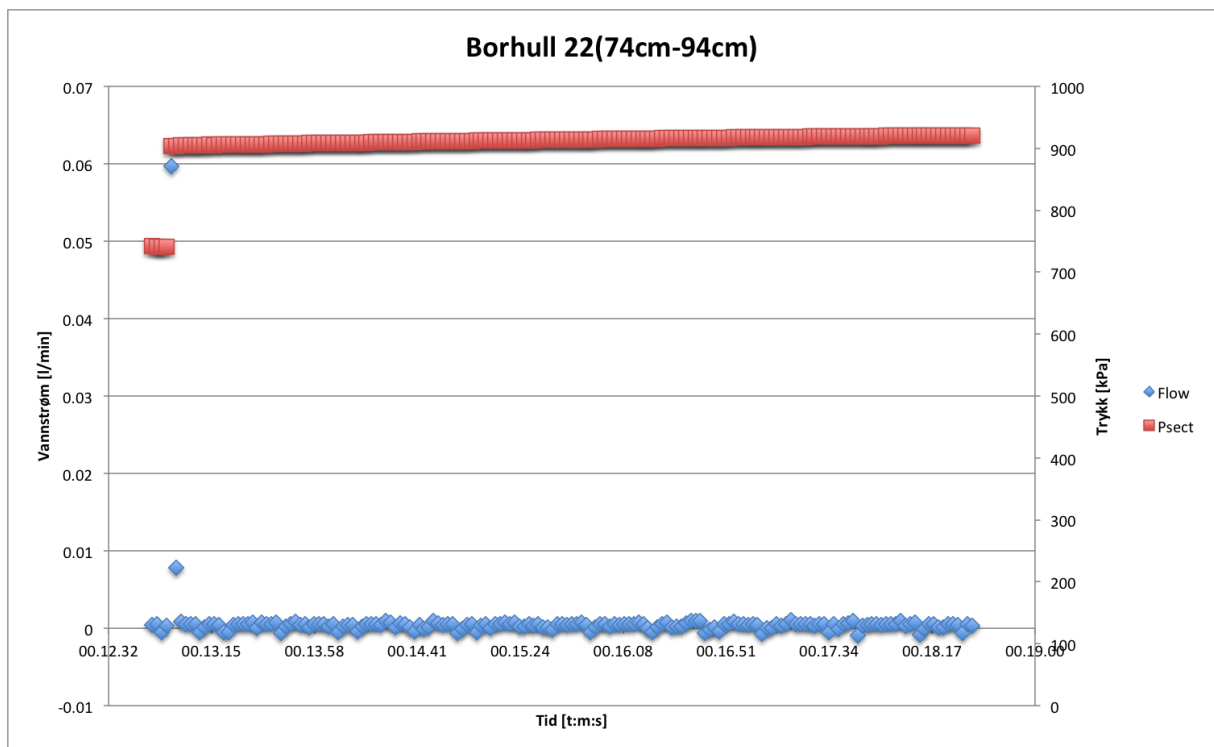
**Figur 63: Borhull 22, 34cm-54cm fra bergoverflaten.**



**Figur 64: Borhull 22, 44cm-64cm fra bergoverflaten.**

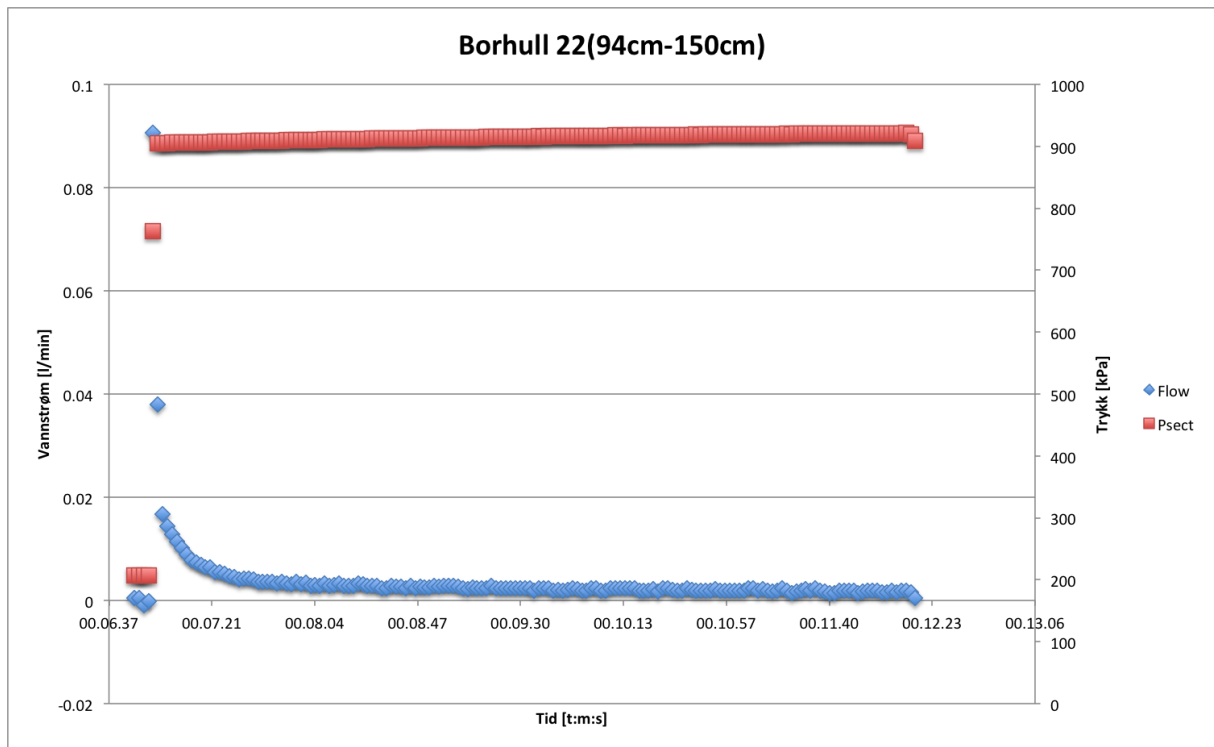


Figur 62: Borhull 22, 54cm-74cm fra bergoverflaten.

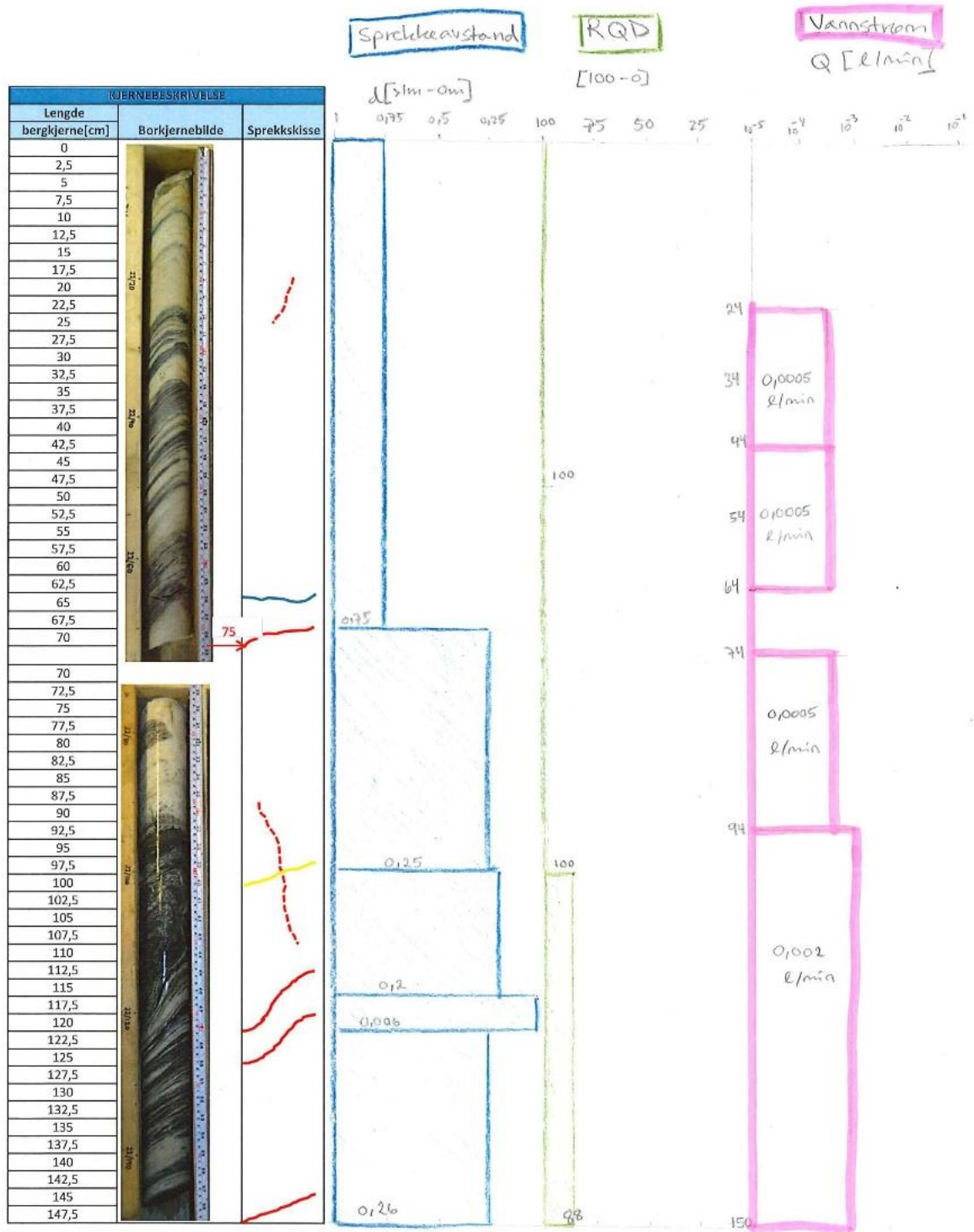


Figur 63: Borhull 22, 74cm-94cm fra bergoverflaten.





**Figur 64: Borhull 22, 94cm-150cm fra bergoverflaten.**



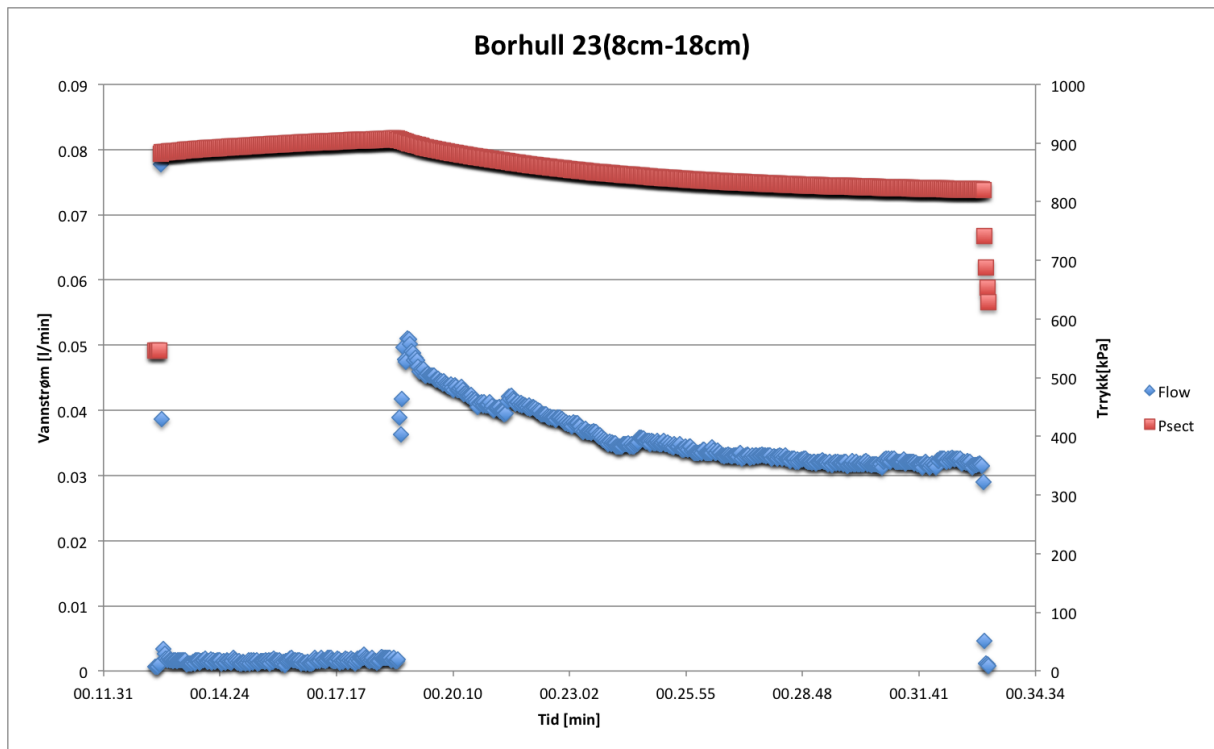
Figur 68: Borkjerne logging for bor hull 22. Hydraulisk måling i ytterste seksjon uten kartlagt sprekk.

## 8.8. Hydrauliske målinger for borhull 23

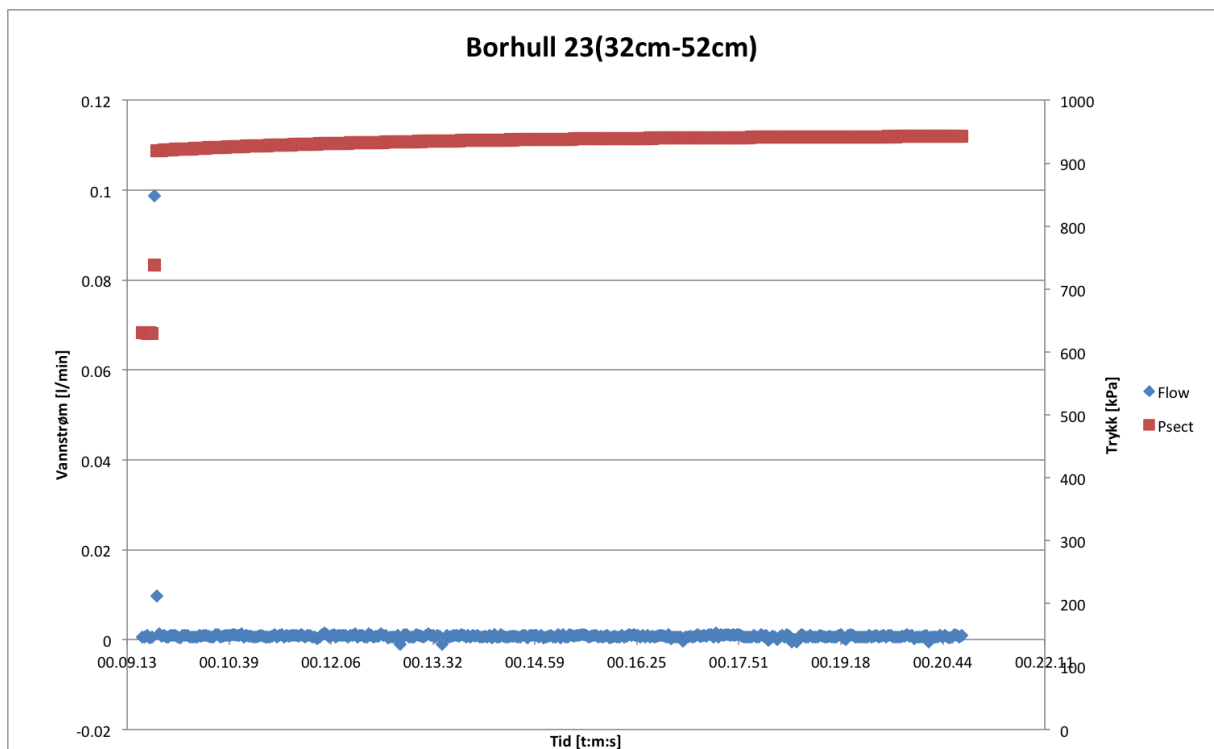
Tabell 12: Hydrauliske målinger for borhull 23

Seksjon [cm]	Vannstrøm [l/min]	Trykk i seksjon [kPa]	Kommentar	Figur
8-18	0,03	820	Når konstant trykk og vannstrøm. Ser av borkjerneloggingen at den høye målingen ikke gir mening. Renner vann ut av borhullet.	Se Figur 69
8-28			Spruter vann ut av hullet	
12-32			Vannet spruter ut av hullet ved fylling av observasjonsområdet. Får maksverdien for vannstrøm som kan måles (1,79 l/min). Får ikke konstant trykk.	
22-42		900	Mansjetten løsner.	Se vedlegg 34
32-52	0,0005	930	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur
42-52			Når ikke konstant trykk	Se vedlegg 35
42-62	0,0010	930	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur
62-82	0,0009	920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur
82-102	0,0014	920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur
102-154	0,0015	920	Når konstant trykk og vannstrøm.	Se Figur 65

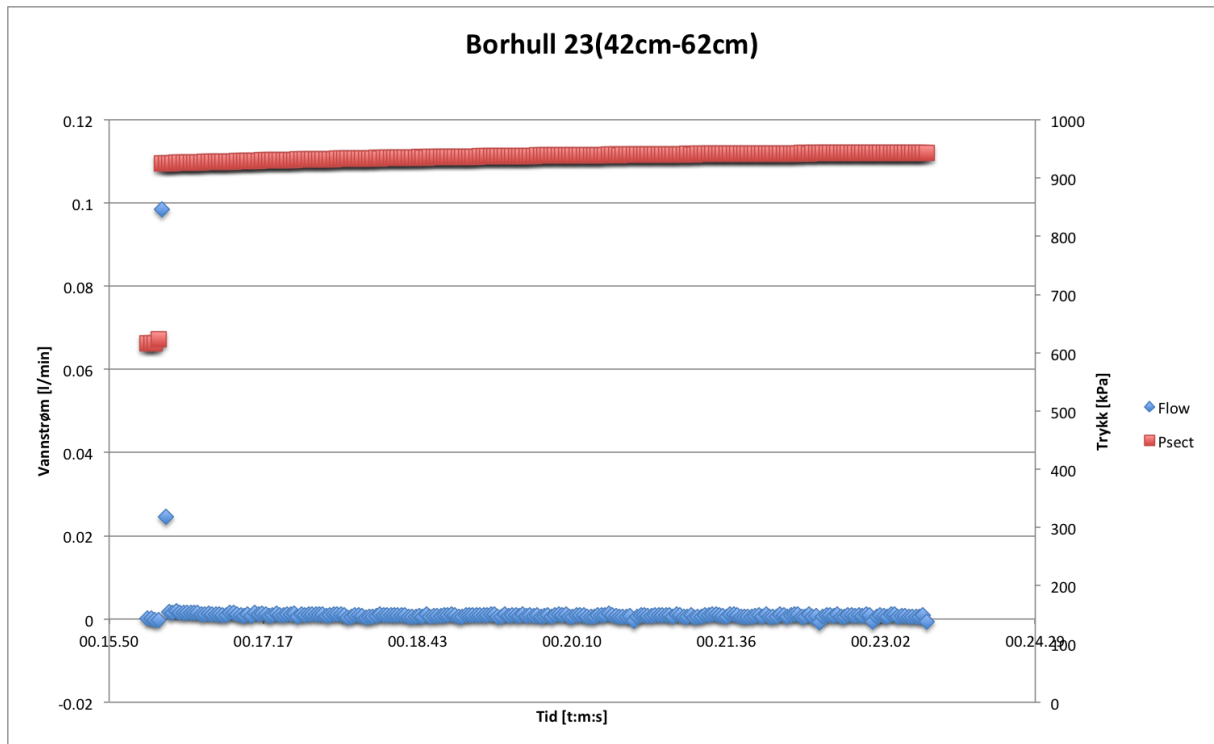
Av borkjerneloggingen for borhull 23, se Figur 75, ses det at målingen for seksjon 8cm-18cm ikke gir mening. Grunnen til denne målingen kan være feil borkjernekarlegging eller feil ved utstyret. Det er mest sannsynlig at det er en feil ved måleuttstyret, da vannstrømmen var såpass høy.



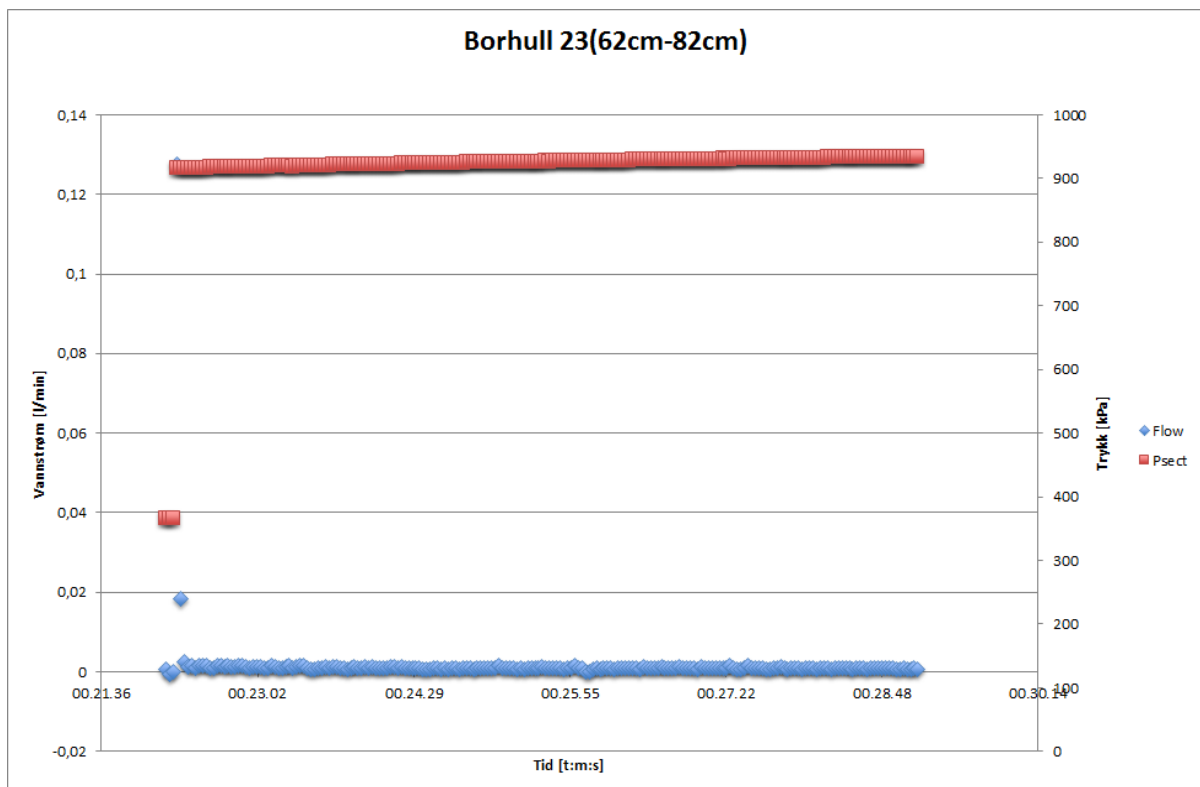
**Figur 69: Borhull 23, 8cm-18cm fra bergoverflaten.**



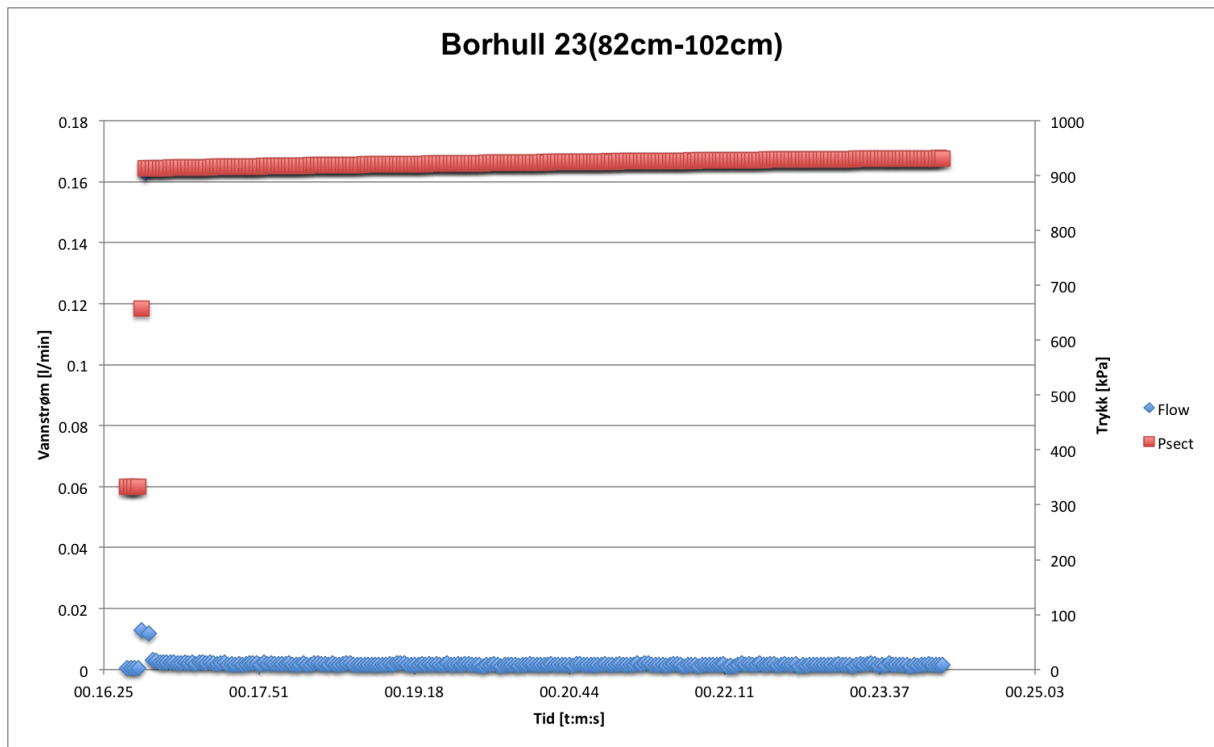
**Figur 70: Borhull 23, 32cm-52cm fra bergoverflaten.**



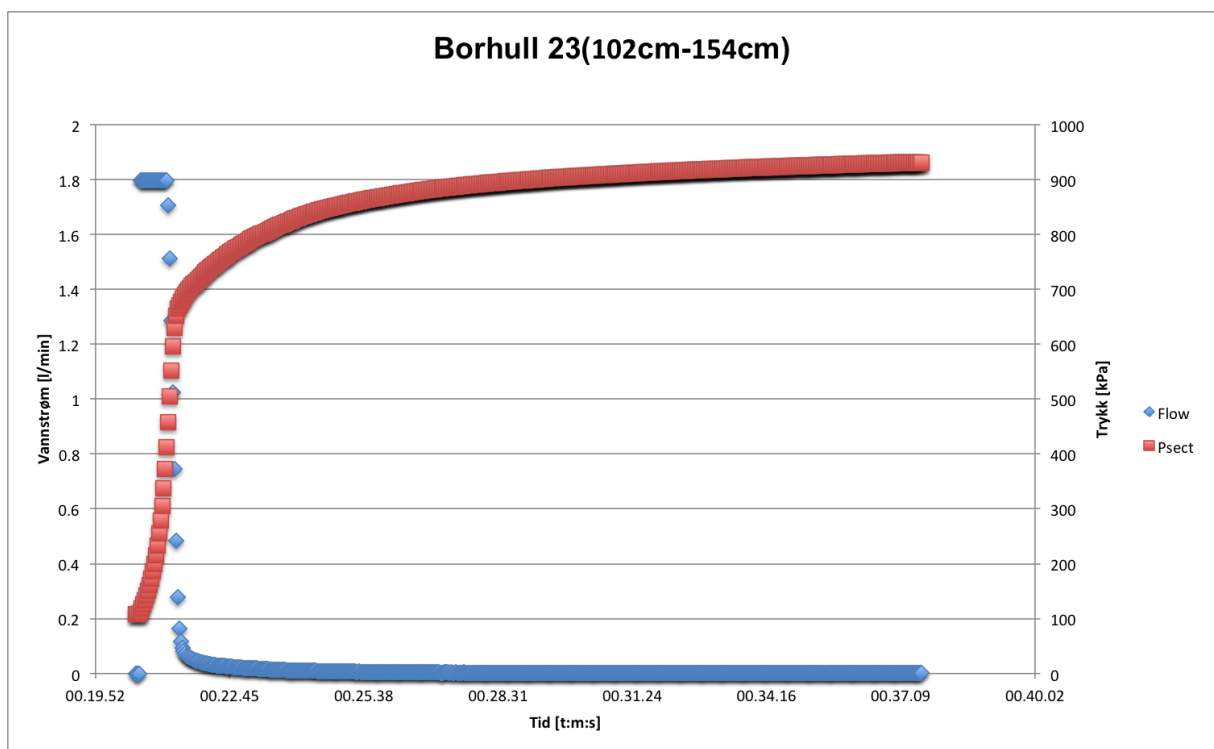
Figur 71: Borhull 23, 42cm-62cm fra bergoverflaten.



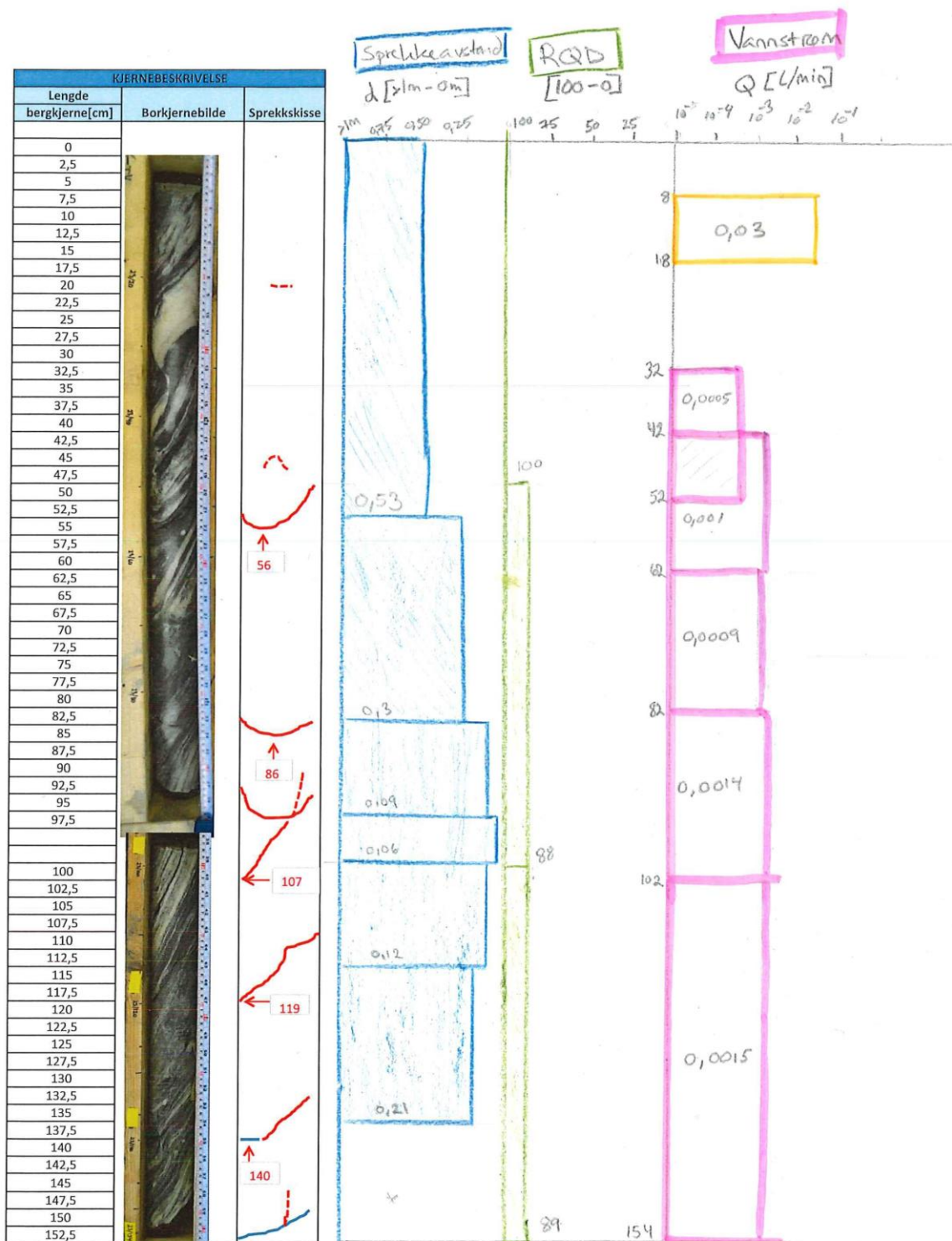
Figur 72: Borhull 23, 62cm-82cm fra bergoverflaten.



Figur 73: Borhull 23, 82cm-102cm fra bergoverflaten.



Figur 65: Borhull 23, 102cm-154cm fra bergoverflaten.



Figur75: Borkjerne logging for borhull 23. Den høye vannstrømmingen i ytterste seksjon er antatt feil.



## 8.9. Beregning av transmissivitet og sprekkebredde

Ut fra de gyldige hydrauliske målingene utført i Arna for borhull fra både sprengt- og TMB-tunnel regnes transmissiviteten og sprekkeåpningen ut ved bruk av Moyes formel (Ligning 5), Mansjettmålingsformelen (Ligning 6) og sprekkebredden ved bruk av den kubiske formelen (Ligning 4). Injeksjonstrykket er bestemt ved å ta seksjonstrykket, som ble målt og representert i grafene i delkapittel 8.1-8.8., minus lufttrykket. Resultatene kan leses ut av Tabell 13.

Transmissiviteten som er brukt i den kubiske formelen er verdien fått ved bruk av Moyes formel.

Transmissiviteten i den sprengte delen er i størrelsesorden  $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  til  $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , mens transmissiviteten for TBM-delen har en størrelsesorden på  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  til  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Sprekkeåpningen viser en større verdi for den sprengte delen enn for TBM-delen. Grunnen til dette er sprengningsskadesonen som har et mye større antall sprekker i seksjonene som ble målt.

Tabell 13: Utregninger av transmissivitet ved bruk av Moyes og Mansjettmålingsformelen. Sprekkebredden er regnet ved bruk av den kubiske lov.

Borhull	Driving	Avstand fra bergoverflaten [cm]	Vannstrøm Q [m <sup>3</sup> /s]	Injeksjonstrykk Δp [Pa]	T-Moyes [m <sup>2</sup> /s]	T-Manschett [m <sup>2</sup> /s]	b-Sprekkeåpning [m]
9	Sprengt	3-23	2,09E-05	420000	1,08919E-07	1,28874E-07	5,5885E-05
12	Sprengt	20-40	1,50E-05	690000	4,77349E-08	5,64805E-08	4,24495E-05
18	TBM	28-48	1,67E-08	803000	4,5575E-11	5,39249E-11	4,17994E-06
18	TBM	48-58	0,00E+00	803000	0	0	0
18	TBM	48-68	8,35E-09	817000	2,2397E-11	2,65004E-11	3,29856E-06
18	TBM	68-88	8,35E-08	804000	2,27592E-10	2,69289E-10	7,14463E-06
18	TBM	88-159	3,34E-08	816000	1,70664E-10	1,87098E-10	6,49095E-06
21	TBM	12-32	1,84E-07	811000	4,9638E-10	5,87323E-10	9,26544E-06
21	TBM	22-42	6,68E-08	832000	1,75946E-10	2,08181E-10	6,55724E-06
21	TBM	32-52	2,34E-07	790000	6,4855E-10	7,67372E-10	1,01292E-05
21	TBM	42-62	1,17E-07	820000	3,12411E-10	3,69649E-10	7,9403E-06
21	TBM	52-72	3,34E-08	830000	8,81849E-11	1,04341E-10	5,20866E-06
21	TBM	72-82	1,67E-08	820000	2,25899E-11	3,07667E-11	3,308E-06
21	TBM	72-92	1,34E-07	820000	3,57041E-10	4,22456E-10	8,30171E-06
21	TBM	92-158	3,84E-07	810000	1,92311E-09	2,1135E-09	1,45522E-05
22	TBM	24-44	8,35E-09	818000	2,23696E-11	2,6468E-11	3,29722E-06
22	TBM	34-54	0,00E+00	820000	0	0	0
22	TBM	44-64	8,35E-09	820000	2,23151E-11	2,64035E-11	3,29453E-06
22	TBM	54-74	0,00E+00	820000	0	0	0
22	TBM	74-94	8,35E-09	814000	2,24796E-11	2,65981E-11	3,30261E-06
22	TBM	94-150	3,34E-08	815000	1,55688E-10	1,72142E-10	6,29525E-06
23	TBM	8-18	5,01E-07	720000	7,71821E-10	1,05119E-09	1,07341E-05
23	TBM	32-52	8,35E-09	830000	2,20462E-11	2,60854E-11	3,28125E-06
23	TBM	42-62	1,67E-08	830000	4,40924E-11	5,21707E-11	4,13412E-06
23	TBM	62-82	1,50E-08	820000	4,01671E-11	4,75263E-11	4,0076E-06
23	TBM	82-102	2,34E-08	820000	6,24822E-11	7,39297E-11	4,64351E-06
23	TBM	102-154	2,51E-08	820000	1,12519E-10	1,24785E-10	5,64942E-06

## 9. Laboratorieundersøkelser

Følgende kapittel tar for seg laboratorietestene som ble utført i forbindelse med masteroppgaven. Disse testene er UCS-test og lyd hastighetstest. Ut fra UCS-testen får man kjennskap til Elastisitetmodulen (E-modulen). Hovedmålet med undersøkelsene er å se om det er en trend i E-modul og lyd hastighet for borkjerner i sprengningsskadesonen. Det ble utført laboratoriumstester på borkjernene fra både Arna- og Fløen-siden.

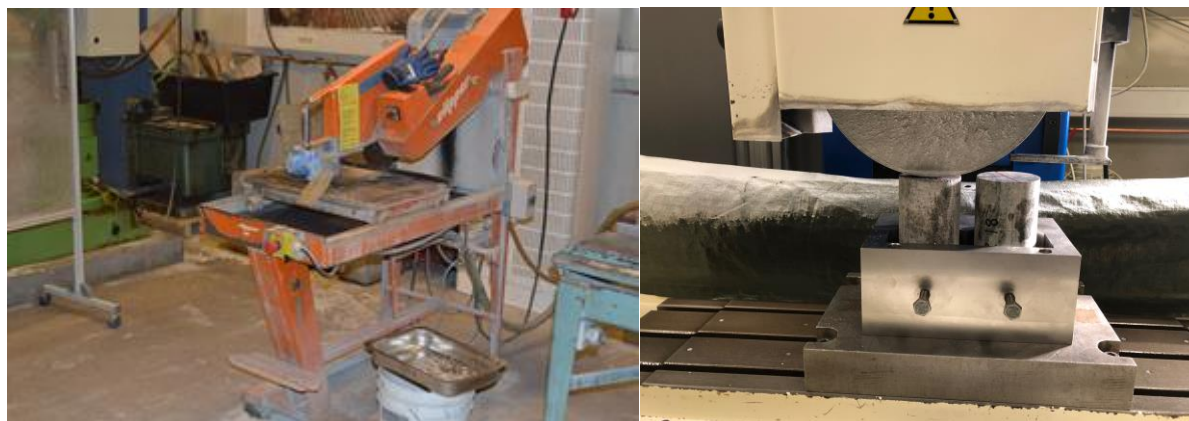
### 9.1. Preparering av prøver

Bergprøvene hvor laboratorietester skulle bli utført på ble valgt ut ifra deres plassering i forhold til tunnelkonturen. Dette er for å sammenligne styrken og påvirkning berget har av mikroriss, induert av sprengning. Prøvene velges fra tunnelkontur til 50cm inn i borhullet for borprøvene fra konvensjonell driving. I tillegg til lengre inn i borhullet for å se om det var en forskjell. For testene som ble valgt fra TBM-delen ble det valgt kjerner fra både nær kontur og lengre inn i borhullet. Undertegnede prøvde å velge kjerner som hadde lik geologi, men dette viste seg vanskelig for borkjernene fra Arna-siden, da geologien er så forskjellig. Det var forskjell i geologi også innad i borhullene.

Flere steder var det sprekker som gjorde det vanskelig å finne prøver som var lange nok for å få en gyldig verdi fra UCS-testene. Kjernelengden til prøven skal helst være lik 2,5 ganger diameteren til borkjernen. Så lenge lengden er over 2D skal spenningskurven i kjerneprøven induert av det påførte trykket under UCS-testen være upåvirket. Ser forholdet mellom lengde og diameter i Tabell 14 Tabell 15.

Etter at prøvene var valgt ut ble borkjernene kuttet i lengder på ca. 2,5 ganger diameteren. For å få en jevn kontaktflate når UCS-testen skulle gjennomføres ble prøvene planslipt. Utstyret som ble brukt ses i Figur .

Av borkjernene fra Arna-siden ble det valgt ut 18 prøver. Ni fra den sprengte delen og ni fra TBM-delen. Fra Fløen-siden ble det valgt ut tolv prøver. Seks fra den sprengte delen og seks fra TBM-delen. Prøvene er oppsummert i Tabell 14 og Tabell 15. Figur 66 og Figur 67 viser kjernene som skal testes for Arna-siden. Figur 68 viser kjernene som skal testes for Fløen-siden.



Figur 76: Preparering av borkjerner for lydtest og UCS-test. Venstre: Diamantsag. Høyre: Planslipemaskin.

**Tabell 14: Kjerner fra Arna-siden som skal laboratoriumstestes.**

Kjernennummer	Borhull	Type driving	Avstand fra bergoverflate [cm]	Lengde/Diameter	Type bergart
1	18	TBM	1,4 -16,9	2,21	Anortosittisk gneis
2	20	TBM	16,2-32,6	2,42	Anortosittisk gneis
3	20	TBM	32,6-49	2,42	Anortosittisk gneis
4	20	TBM	49,6-66,1	2,42	Anortosittisk gneis
5	22	TBM	19,2-35,6	2,40	Anortosittisk gneis
6	22	TBM	36,1-52,6	2,42	Anortosittisk gneis
7	17	TBM	117,2-133,6	2,41	Anortositt
8	18	TBM	134-150,5	2,42	Anortosittisk gneis
9	22	TBM	128,3-144,8	2,41	Anortosittisk gneis
10	6	Sprengt	7,2-23,8	2,42	Anortosittisk gneis
11	6	Sprengt	37,1-53,7	2,42	Anortosittisk gneis
12	8	Sprengt	23,1-39,6	2,42	Anortosittisk gneis
13	9	Sprengt	42,1-58,6	2,42	Metagabbro
14	10	Sprengt	14,2-29,5	2,24	Korona anortositt
15	10	Sprengt	30-46,5	2,41	Korona anortositt
16	6	Sprengt	141,6-158,2	2,42	Anortosittisk gneis
17	10	Sprengt	147,4-163,8	2,38	Anortosittisk gneis
18	11	Sprengt	133,6-150,2	2,41	Anortositt

**Tabell 15: Kjerner fra Fløyen-siden som skal laboratoriumstestes.**

Kjernennummer	Borhull	Type driving	Avstand fra bergoverflate [cm]	Lengde/Diameter	Type bergart
19	2	Sprengt	40 -56,4	2,44	Mylonittgneis
20	2	Sprengt	94-110,5	2,45	Mylonittgneis
21	3	Sprengt	201-216,6	2,30	Mylonittgneis
22	4	Sprengt	0,5-14,2	2,02	Mylonittgneis
23	5	Sprengt	14,5-28,2	2,03	Mylonittgneis
24	5	Sprengt	188-205,6	2,56	Mylonittgneis
25	6	TBM	45,5-60,3	2,19	Mylonittgneis
26	6	TBM	80-96	2,43	Mylonittgneis
27	7	TBM	0-28,4	1,89	Mylonittgneis
28	7	TBM	36-51,5	2,28	Mylonittgneis
29	7	TBM	94,5-108,8	2,09	Mylonittgneis
30	7	TBM	126,5-141,1	2,15	Mylonittgneis



Figur 66 Kjerner fra Arna-siden. Kjernennummer 1-9. Obs: Kjerne nummer 1 er tatt bilde av etter UCS-test.





**Figur 67: Kjerner fra Arna-siden. Kjernennummer 10-18.**



**Figur 68: Kjerner av mylonittgneis fra Fløen-siden. Kjernennummer 19-30.**



## 9.2. Tetthet

Tettheten til bergartene ble bestemt ut fra tyngden og volumet til prøvene. Tettheten ble regnet ut fra Ligning 11, der  $\rho$  er tettheten,  $m$  er massen og  $V$  er volumet.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Ligning 11

Se verdiene for masse, diameter og lengde for å regne ut volum og tetthet i Vedlegg 36 og Vedlegg 37. Tetthetene vises i Tabell 16 og Tabell 17 som oppsummerer verdiene fra laboratoriumstestene.

### 9.3. Lydhastighetstest

Lydhastighetstest benyttes for å sammenligne med verdiene fra UCS-testen. Lydhastighetstesten benyttes også til å vise styrke og vise i hvilken grad prøven er intakt. Gangtiden måles ved å bruke et instrument som benytter elektrisk lyd, se Figur. Før bruk kalibreres maskinen, og ultralydgelé blir brukt for å få en direkte kontaktflate.



Figur 80: Lydhastighetsstest, her av prøvenummer 7.

For å finne lydhastigheten til prøvene brukes Ligning 12, der  $v$  er p-bølgehastigheten,  $s$  lengden til prøven og  $t$  er gangtiden.

$$v = \frac{s}{t} \qquad \text{Ligning 12}$$

Se verdiene for gangtid og lengden til prøvende i Vedlegg 36 og Vedlegg 37. Ser verdiene for målte hastigheter i Tabell 16 og Tabell 17 som oppsummerer verdiene fra laboratoriumstestene.

Svakt berg vil gi lavere hastighet enn sterkt berg, dette kan skyldes luftporer eller en svakhet i prøven. Lagdelingen har også noe å si for p-bølgehastigheten. P-bølgehastigheten er lavere for prøver med lagdelingen normalt på aksialretningen enn for prøver med lagdeling i aksialretning. For Arna-siden hadde metagabbroen den høyeste verdien for hastighet, denne bergarten har også en høy tetthet, se Tabell 16.

#### 9.4. UCS-test og måling av E-modul

UCS-test, også kalt enaksial trykkfasthetstest, ble gjennomført for å måle styrken til borkjerne på både Arna- og Fløyen-siden. Testen ble i hovedsak brukt til å se på verdiene for E-modul for å se om en kan påvise mikroriss i EDZ.



Figur 691: Trykkcelle brukt for UCS-test

Forsøket utføres ved å bruke en enaksial trykkcelle som bruker et hydraulisk stempel til å påføre last på prøvene med konstant spenningsøkning. Foliajonen har påvirkning på når prøven går i brudd. En ideell test tas vinkelrett på foliasjonen. Prøvene som ble testet ble tatt ut som kjerner, så foliasjonen er ikke tatt hensyn til. Se Vedlegg 38 og Vedlegg 39 for foliasjonsretninger og type brudd.

Ideelt forhold mellom lengden og diameteren er på 2,5. Noen av testene er under denne grensen, da soner med intakt berg ikke var langt nok. Dette kan ha innvirkning på spenningstilstanden i prøvestykkene fra lasthodene. Andre hensyn som ble tatt under preparering av prøvene var å få glatte og hele overflater. Dette er for å få mest mulig riktig resultat. (ISRM, 1979) Borkjernene har forskjellig diameter grunnet kjerneuttak og bytting av drillustyr under drillingen. Det ble ikke valgt testkjerner med markant differanse i diameter.

Under testene ble det satt på en plastmembran rundt prøvene for å beskytte maskinen mot skader ved brudd, samt for å hindre at kjernene beveger seg. Membranen kan ha ujevn kontur og kan påvirke utstyret som måler tøyning i radiell retning. Figur 691 viser trykkcellen som ble brukt til UCS-tester.

Prøvene ble belastet aksialt, til de gikk i brudd. Spenningen når kjernen går i brudd tilsvarer UCS-verdien. For å måle aksial og radiell tøyning ble det montert tøyningmålere rundt prøven før testen startet. E-modul blir funnet ut ifra plotting av tøyninger og lasten, i en spennings-tøyningkurve. I denne oppgaven er det brukt tangentmodulen for å finne E-modul. E-modulen er da definert som helningen til tangenten i et bestemt punkt. Ved valg av punkt for å sette tangenten ble det valgt der kurven var mest lineær. (Palmstrøm mfl., 2003) E-modul E blir funnet ved bruk av Ligning 13.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Ligning 13

Der  $\Delta\sigma$  er endring i spenning og  $\Delta\varepsilon$  er endring i aksiell tøyning.

Resultatene fra UCS-forsøkene er oppgitt i Tabell 16 og Tabell 17, med verdiene for trykkfastheten(UCS) Youngs modulus (E-modul) og Poissons forhold ( $\nu$ ).

**Tabell 16: Resultater for laboratoriumstester for Arna-siden. Fargekoder: Blå: TBM. Lyse oransje: Sprengt, nær bergoverflate. Mørke oransje: Sprengt, avstand fra bergoverflate. Metagabbroen er trukket fra for fremstilling senere, da den er mer massiv enn de andre bergartene.**

Prøvenummer	Borhull-plassering	Type driving	Avstand fra bergoverflaten [cm]	UCS [MPa]	E-modul [GPa]	Poissons forholdstall	Lydhastighet [m/s]	Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	Type bergart
1	18	TBM	1,4 -16,9	118	78,22	0,30	6215,66	2853	Anortosittisk gneis
2	20	TBM	16,2-32,6	159,1	64,06	0,34	5339,29	2964	Anortosittisk gneis
3	20	TBM	32,6-49	151,1	51,52	0,36	4338,52	2881	Anortosittisk gneis
4	20	TBM	49,6-66,1	143,3	56,45	0,37	4474,46	2885	Anortosittisk gneis
5	22	TBM	19,2-35,6	78,8	54,62	0,26	5154,09	2941	Anortosittisk gneis
6	22	TBM	36,1-52,6	18,9	24,35	0,13	4508,99	2921	Anortosittisk gneis
7	17	TBM	117,2-133,6	97,9	62,03	0,29	4637,29	2863	Anortositt
8	18	TBM	134-150,5	95,3	63,29	0,24	5417,43	2892	Anortosittisk gneis
9	22	TBM	128,3-144,8	112,8	58,31	0,27	4794,48	2948	Anortosittisk gneis
10	6	Sprengt	7,2-23,8	94,9	61,54	0,28	5205,03	2906	Anortosittisk gneis
11	6	Sprengt	37,1-53,7	101,1	68,51	0,31	5997,46	3046	Anortosittisk gneis
12	8	Sprengt	23,1-39,6	89	61,60	0,27	4630,25	2949	Anortosittisk gneis
13	9	Sprengt	42,1-58,6	168	83,93	0,29	6539,53	3276	Metagabbro
14	10	Sprengt	14,2-29,5	153,9	69,51	0,44	4559,82	3019	Korona anortositt
15	10	Sprengt	30-46,5	129,1	66,10	0,40	4375,60	3147	Korona anortositt
16	6	Sprengt	141,6-158,2	100,8	61,29	0,23	5769,69	2991	Anortosittisk gneis
17	10	Sprengt	147,4-163,8	111,1	56,84	0,24	5288,71	3084	Anortosittisk gneis
18	11	Sprengt	133,6-150,2	57,5	61,92	0,35	6175,37	2911	Anortositt

**Tabell 17: Resultater for laboratoriumstester for Fløen-siden. Merk: Borhullsplasseringen er for Fløen. Fargekoder: Blå: TBM. Lyse oransje: Sprengt. nær bergoverflate. Mørke oransje: Sprengt, avstand fra bergoverflate.**

Prøvenummer	Borhull-plassering	Type driving	Avstand fra bergoverflaten [cm]	UCS [MPa]	E-modul [GPa]	Poissons forholdstall	Lydhastighet[m/s]	Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	Type bergart
19	2	Sprengt	40 -56,4	153,9	65,89	0,25	4950	2684.81698	Mylonittisk gneis
20	2	Sprengt	94-110,5	138,1	61,50	0,23	5130	2673.40608	Mylonittisk gneis
21	3	Sprengt	201-216,6	141,7	62,92	0,26	5198	2669.69635	Mylonittisk gneis
22	4	Sprengt	0,5-14,2	110,1	57,22	0,81	5010	2665.11858	Mylonittisk gneis
23	5	Sprengt	14,5-28,2	107,4	59,76	0,40	5351	2675.37781	Mylonittisk gneis
24	5	Sprengt	188-205,6	123,7	74,86	0,25	5134	2670.4643	Mylonittisk gneis
25	6	TBM	45,5-60,3	143,7	64,00	0,25	5439	2659.105022	Mylonittisk gneis
26	6	TBM	80-96	115,1	64,78	0,21	5156	2661.905521	Mylonittisk gneis
27	7	TBM	0-28,4	55,9	49,92	0,27	5267	2658.429391	Mylonittisk gneis
28	7	TBM	36-51,5	137,8	65,22	0,24	5202	2669.415639	Mylonittisk gneis
29	7	TBM	94,5-108,8	138,2	65,37	0,25	4980	2660.450741	Mylonittisk gneis
30	7	TBM	126,5-141,1	39,9	56,27	0,35	4950	2658.171547	Mylonittisk gneis

## 9.5. Diskusjon av labresultater:

Selv om prøvene er tatt ut fra omtrent samme område med tanke på tunellkonturen, er det stor forskjell innad i geologien. Et eksempel på dette er prøve 14, 15 og 17, som alle er fra borehull nummer 10, se Figur .Ytters består geologien av korona anortositt, mens det lengre inne består av anortositt. Dette gjør at sammenligningen mellom styrken av berget i EDZ sonen og i ”uberørt”-sone ikke lar seg gjøre på et godt grunnlag.



**Figur 82: Prøve 14, 15 og 17 fra borhull 10 på Arna-siden. Prøve 14 og Prøve 15 er korona anortositt, mens prøve 17 er anortosittisk gneis.**

Foliasjonen, lagdelingen og øyene i korona anortositten påvirker målingene av styrken i bergmassen ved lydshastighetstestene og ved UCS-testene. UCS-testene måler styrken i formasjonene istedenfor i bergmassen, da bruddet ofte først går i foliasjonen. Prøvene har forskjellig vinkel på foliasjonen, noe som gjør at forholdene ikke er like for borkjernene. Kan også være svakheter i prøvene, som ikke er observert. Foliasjonen påvirker testene slik at en får lavere UCS-verdi, enn det som representerer bergmassen.

Oppsprekningen i EDZ sonen gjorde det vanskelig å velge prøver som var lange nok til å testes. Det er laboratoriumsresultater fra denne sonen som er interessant for laboratoriumstestene. Dette gjør at de mest ideelle seksjonene for testene blir valgt bort.

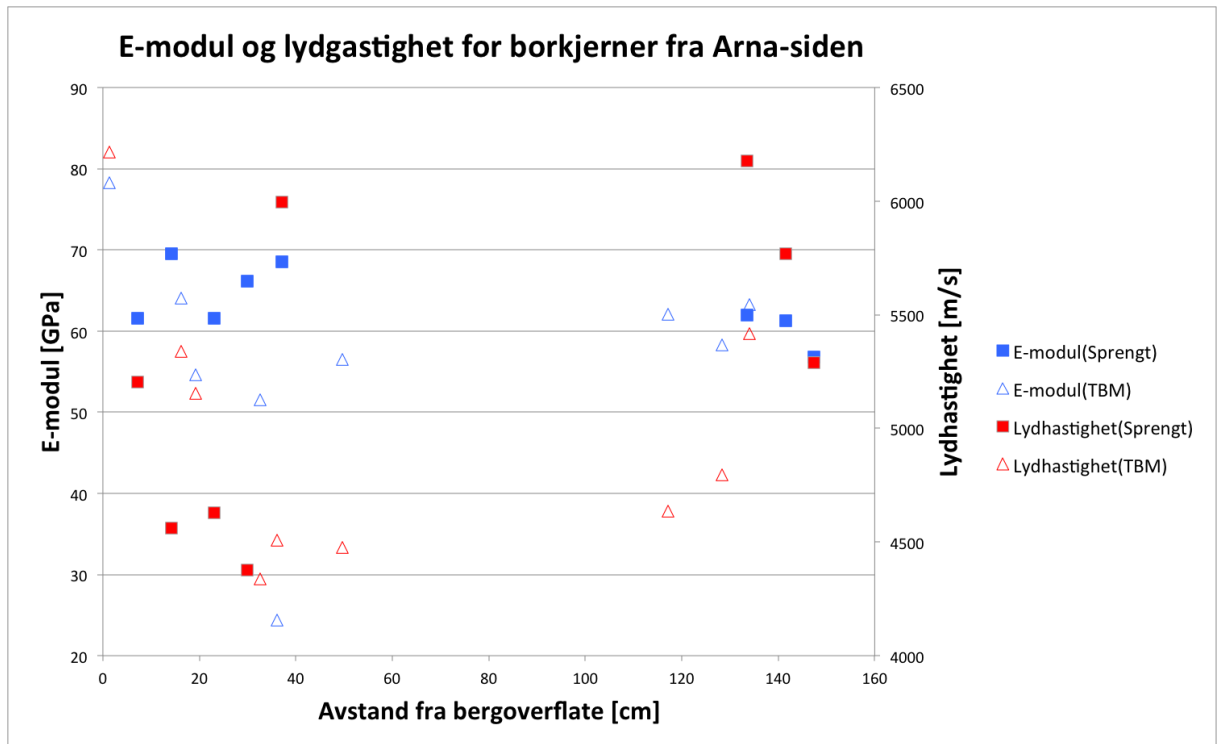
Om tøyningmålingsinstrumentet blir plassert på et lite ideelt sted, f.eks. på et sted hvor det er en bulk i plastmembranen, kan dette påvirke resultatene fra UCS-testen. Under utførelsen av testene prøvde en å være påpasselig med dette, så denne feilkilden er liten

En del av kjernene, spesielt fra Fløen-siden, har et lavt tall for forholdet mellom lengden på kjernene og diameterstørrelsen. Dette kan påvirke troverdigheten til testene. Har lik geologi, alt er mylonittgneis, men er skifrig, og har flere svakheter i testprøvene.

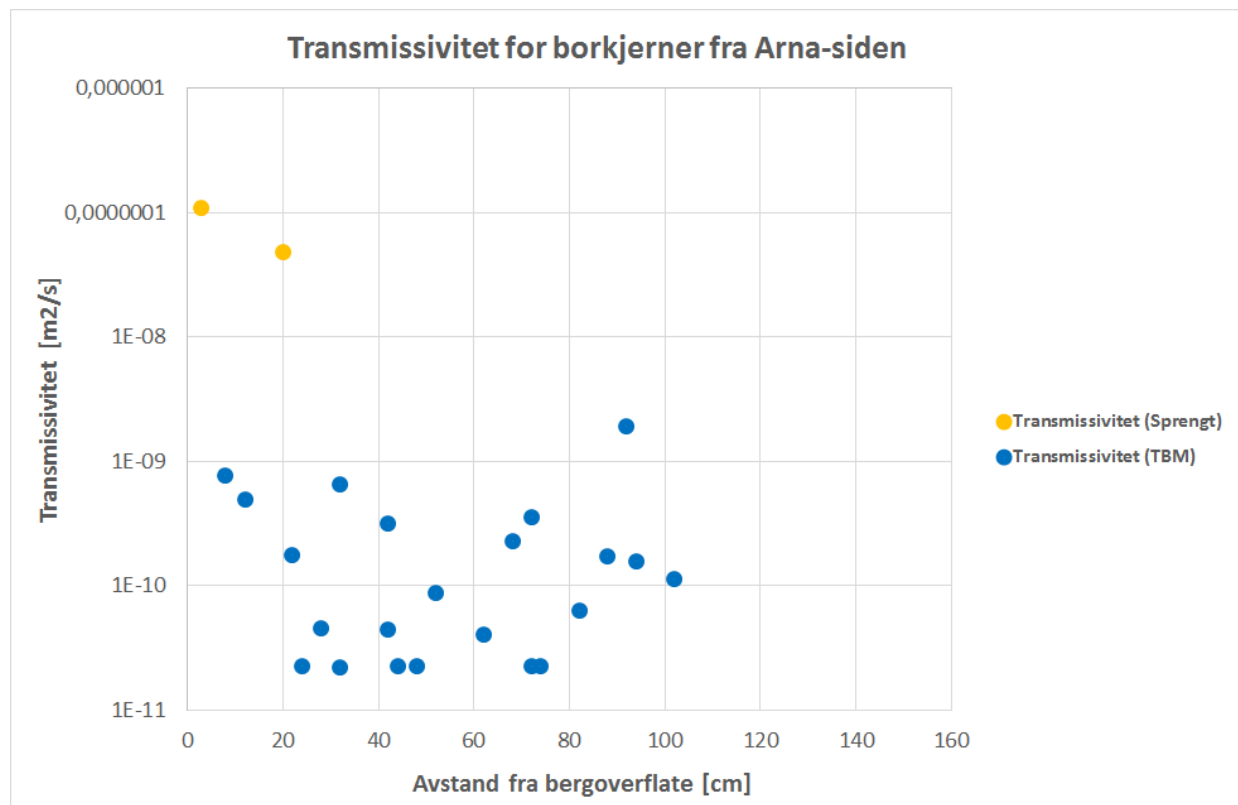


# 10. Samlet diskusjon av resultater fra felt og laboratorium

## 10.1 Arna-siden



Figur 70: E-modul og lydastighet for borkjerner for Arna-siden.



Figur 84: Transmissivitet for borkjerner fra Arna-siden. Transmissiviteten i y-aksen er fra  $10^{-11}$  til  $10^{-6}$

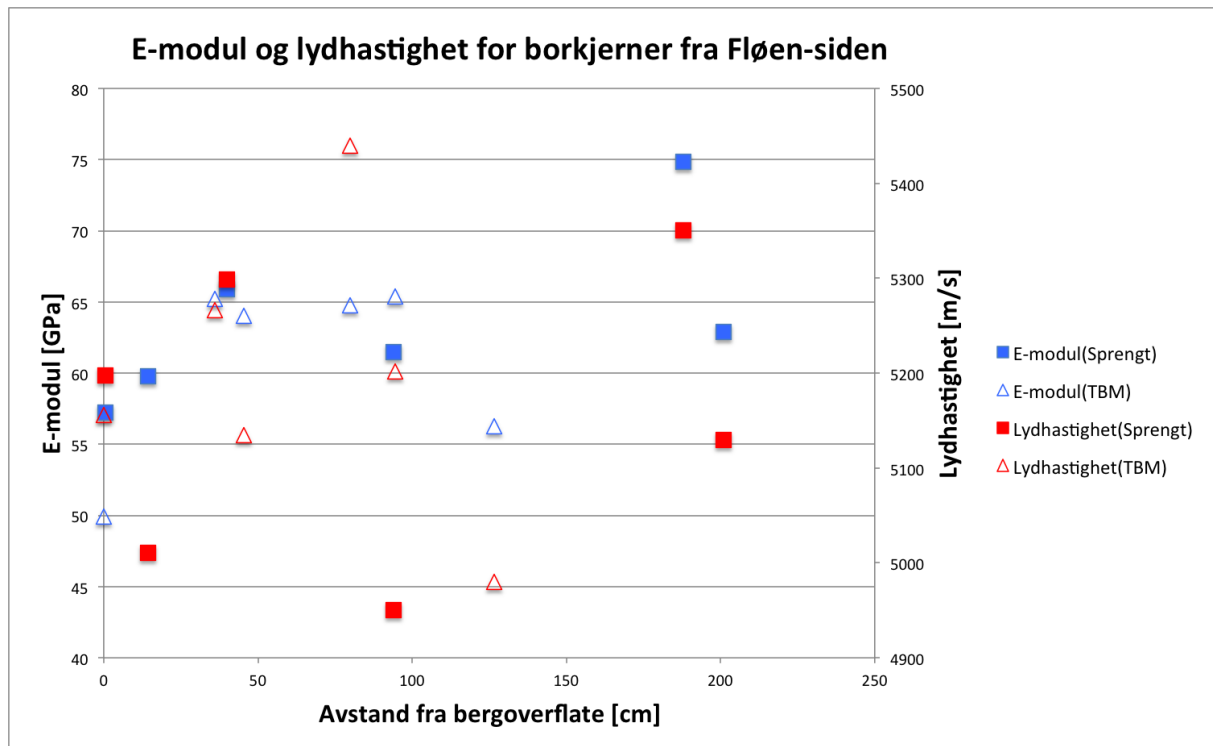
*E-modul:* Ser ingen trend. E-modulen er tilnærmet lik for TBM-del og Sprengt-del lengre inn i borhullet. I nærheten av bergoverflaten er E-modulen høyere for Sprengt-del enn for TBM-del. Dette er motsatt av det en antok en skulle se om en skulle se en trend. Var antatt at bergmassen i EDZ ville ha en lavere E-modul enn det upåvirkede berget. Tenkte mikroriss ville redusere E-modul. Ikke tilfelle.

*Lydhastighet:* Vanskelig å se noe sammenheng med EDZ og lydhastighet. For kjernene i nærhet av bergoverflate ser det ut som lydhastigheten er mye den samme for TBM- og Sprengt-kjerner. Lengre inn i borkjerne er lydhastigheten høyere for sprengt enn TBM. I denne sonen gjelder ikke EDZ, og berget blir sett på som upåvirket, om en tar dette i betraktning kan en si at lydhastigheten blir redusert i EDZ. Må ta med i betraktning at to av borkjernene fra EDZ som ga en lav lydhastighet består av korona anortositt, som viser seg å ha en lavere hastighet enn anortosittisk gneis.

*Transmissivitet:* Det er kun to målinger i den sprengte delen, grunnet sprøytebetongtykkelsen. Ser en tydelig forskjell i transmissivitet. Høy transmissivitet i EDZ. Transmissiviteten i TBM-delen ser ikke ut til å bli påvirket av hvor i borhullet testene er tatt.

Ut fra resultatene fra Arma-siden er EDZ påvist. Sprengningsskadesonen har en høyere hydraulisk transmissivitet enn intakt berg. Kan også se en svak trend ved å sammenligne sonene separert at lydhastigheten i sprengt sone er redusert i nærhet av kontur i forhold til lengre inn i borhullet. E-modulen indikerer ikke noe.

## 10.2. Fløyen-siden



Figur 71: E-modul og lydghastighet for borkjerner for Fløyen-siden

*Lydghastighet:* Ser ingen tydelig trend. Var stor forskjell i bergmassekvaliteten mellom sprengt-del og TBM-del, derfor blir det feil å sammenligne mellom de to sonene. Ved å se på lydghastigheten for den sprengte delen, ser en at gjennomsnittshastigheten er lavere i nærhet av kontur i forhold til lengre inn i borkullet.

*E-modul:* For E-modul i sprengt del, ser en at gjennomsnitt E-modulen er lavere nærmere tunnelkonturen. Er få målinger, så blir feil å trekke en slutning ut fra dette. De to borkjernen som er nærmest tunneloverflaten, Prøvenummer 22 og 23 er i tillegg korte. Har et lengde/diameter forhold på ca. 2.

## 11. Konklusjon

Ut fra resultatene fra laboratoriumstester, beregninger av transmissivitet basert på hydrauliske in-situ vanntrykksmålinger og borkjernelogging er sprengningsskadesonen påvist. Sprengningsskadesonen har vist seg, som antatt, å ha en høyere hydraulisk transmissivitet enn intakt berg. Ut fra testene av lyd hastighet kan det ses en svak trend til at lyd hastigheten i sprengt sone er redusert i nærhet av kontur i forhold til lengre inn i borhullet. E-modulen har ikke gitt noen indikasjon på mikroriss, dette kan være grunnet at det ikke er noe mikroriss eller at kjernene som ble testet ikke var optimale. Ved undersøkelsene gjort for denne masteren endrer geologien seg mye og det er viktig å ha dette i bakhodet ved sammenligningen av resultatene.

Sprengningsskadesonen ble observert til å ligge i hovedsak mellom 20cm og 50cm fra bergoverflaten. Dette gir mening med teorien om en sprengningsskadesone på opptil 50cm.

Den økte hydrauliske karakteren i umiddelbar nærhet av tunnelkonturen kan brukes som en drenerende effekt i tunnelkledninger med vannsikring i direktekontakt med bergsikringen. Ved å ha en konduktiv sone som drenerer, unngås en oppbygging av høyt vanntrykk inn mot vannsikringsløsningen. For jernbanetunneler gjelder dette plasstøpt betonghvelv med foliemembran og drenerende filtduk og sprøytebetong med sprøytbar membran.

Forskning har vist at bergets oppsprekking i sprengningsskadesonen har en betydelig drenerende effekt. Feltforsøk har vist at i sprengningsskadesonen er det en svak til moderat trykkoppbygging bak membranen. Vanntrykket er ikke på et nivå hvor skade på tunnelkonstruksjon er ventet og vanntrykket er ikke nær teoretisk høyeste vanntrykk. Ved å ha en konduktiv sone i umiddelbar nærhet av tunnelkonturen viser det seg at grunnvannet gjennom naturlige og sprengningsinduserte sprekker i bergoverflaten velger å ta en annen vei i situasjoner med membrantett tunneloverflate. Vannet strømmer til den åpne sålen med installert drenering.

Med mer forskning på feltet om den drenerende sonen og dens innvirkning på tunnelkledning kan en utvikle tunnelkledninger som har lang levetid og som trenger lite vedlikehold. Dette er miljømessig gunstig og betongforbruket kan innskrenkes.

Ved å begrense antall varianter for tunnelkledninger kan kompetansen per kledning øke. Ved bedre kunnskap kan en konstruere tunnelkledninger på en mer bærekraftig måte. Standardiserte løsninger er en mulig løsning. Et av problemene med standardiserte løsninger er at de geologiske forholdene har mye å si for konstruksjonene. Sprøytebetong med sprøytbar membran f.eks. kombineres ikke så bra med store innlekkasjer. I tillegg spiller bruken til tunnelen inn.

Forslag til videre arbeid innebærer valg av nye steder for å utføre kjerneuttak og hydrauliske in-situ vanntrykksmålinger. Ved å gjøre en grundig forundersøkelse for de geologiske forholdene kan en gjøre feltforsøk i områder hvor geologien ikke endrer seg så mye som det har gjort i kjernene undersøkt i denne masteren. I tillegg til å velge å gjøre hydrauliske målinger et godt egnet sted hvor utstyret er tilpasset målingene som skal utføres på best mulig måte og at forutsetningene er gode for å ta gode målinger. Unngå å gjøre målinger i en sone med masse sprøytebetong. Kunne ha gjort hydrauliske målinger på Fløen-siden, men i denne sonen var geologien også forskjellig. Forskjell mellom bergmassekvaliteten mellom nisje og TBM-drevet tunnel. Med en geologi som er mer lik vil det bli lettere å trekke slutninger.

Numerisk modellering kunne blitt brukt for fremstilling av sprekkekarakterene i umiddelbar nærhet av tunnelkontur for både sprengt-del og del drevet ved TBM. På grunnlag av dette ville en fått en finere fremstilling.

## 12. Referanser

- Bane NOR, 2015. *Ved et tidsskille*. Tilgjengelig fra: <http://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2015/ved-et-tidsskille/> [Lest 03.04.2018].
- Bane NOR-Teknisk regelverk, 2016. Endringsartikkel 1312. Bok: 521 Tunneler, prosjektering og bygging. Tilgjengelig fra: [https://trv.jbv.no/wiki/521\\_2016\\_Endringsartikkel\\_1312](https://trv.jbv.no/wiki/521_2016_Endringsartikkel_1312) [Lest 05.05.2018].
- Barton, N. & Choubey, V. 1977. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics, 10, 1-54.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, 6(4): Springer Verlag, Vienna, pp 189-236
- Bäckblom, G. 2008. *Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses*. SKB.
- Deere D. U., Deere D. W., 1989. *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice*. Philadelphia: Am.Soc. Test. Mat.
- Emmelin A., Brantberger M., Eriksson M., Gustafson G., Stille H., 2007. *Rock grouting- Current competence and development for the final repository*. R-07-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson M., 2002. *Prediction of grout spread and sealing effect. A probabilistic approach*. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.
- Fransson Å., 2001. *Characterisation of fractured rock for grouting using hydrogeological methods*. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers Technical University, Gothenburg
- Garathun M. G., 2016. *Halverer mengden betong: Slik kan tunneler koste 30 millioner mindre per kilometer*. Teknisk Ukeblad, 24.juni. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/halverer-mengden-betong-slik-kan-tunneler-koste-30-millioner-mindre-per-kilometer/348832> [Lest 05.02.2018].
- Gustafson G., 2009. *Hydrogeologi för bergbyggare*. Forskningsrådet Formas. Värnamo.
- Gustafson G., Fransson Å., 2005. *The use of the Pareto distribution for fracture transmissivity assessment*. Hydrogeology Journal 14 (1), 15-20.
- Gustafson G., Stille H., 2005. *Stop Criteria for Cement Grouting. Felsbau Rock and Soil Engineering*, No. 3, pp 62–68.
- Gustafson G., Krásny J., 1994. *Crystalline rock aquifers: Their occurrence, use and importance*. Hydrogeology. Journal 2: 64-75.

- Hakami E., 1995. *Aperture distribution of rock fractures*. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Division of Engineering Geology, Stockholm.
- Hernqvist, L., 2009. *Characterization of the fracture system in hard rock for tunnel grouting*. Licentiate Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Holter K.G., 2017a. *Permanent vanntett tunnelkledning basert på sprøytebetong og sprøybar membran*. PowerPoint
- Holter K.G., 2017b. *Waterproofing in Soft ground under the Watertable, Recent method developments and performances*. PowerPoint.
- Holter K.G., 2015a. *Permanent vanntett tunnelkledning med sprøytebetong og sprøybar membran til moderne veg- og jernbanetunneler*, PhD-avhandling, NTNU, Inst. for geologi og bergteknikk.
- Holter K.G., 2015b. *Properties of waterproof sprayed concrete tunnel linings-A study of EVA-based sprayed membranes for waterproofing of rail and road tunnels in hard rock and cold climate*. NTNU
- Holter K.G., Christiansson R., Basnet C. B., 2015. *Effects on ground water pressure in the immediate rock mass around partially drained SCL with bonded waterproof membrane*.
- Holter K.G., 2013. *Vanntett permanent tunnelkledning med sprøybar membran og sprøytebetong.-Virkning, egenskaper og testmetoder*. NTNU. PowerPoint.
- Holter, K.G., Buvik, H., Nermoen, B., Nilsen, B. 2013. *Future trends for tunnel lining design for modern rail and road tunnels in hard rock and cold climate*. Proc. World Tunnel Congress 2013 Geneva, Underground - The Way to the Future! pp 1435–1442
- ISRM. 1979. *Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks*. I: International Journal of Rock Mech, Min. Sci. Geomech 15(19)
- Jernbaneverket, 2015. *Anbefalt konstruksjonsprinsipp for jernbanetunneler*. Tilgjengelig fra: [https://proing.opm.jbv.no/wiki/underbygning/veiledninger/jernbanetunneler\\_anbefalt\\_konstruksjonsprinsipp](https://proing.opm.jbv.no/wiki/underbygning/veiledninger/jernbanetunneler_anbefalt_konstruksjonsprinsipp) [Lest 15.01.2018].
- Jernbaneverkets Teknisk regelverk, 2015. *Tunneler/Prosjektering og bygging/Vann- og frostsikring og Tunneler/Prosjektering og bygging/Laster*. Tilgjengelig fra: [https://trv.jbv.no/wiki/Endringslogg\\_Tunneler/Prosjektering\\_og\\_bygging](https://trv.jbv.no/wiki/Endringslogg_Tunneler/Prosjektering_og_bygging) [Lest 12.04.2018].
- Krill A. G. 2018. ”Skriftlig kommunikasjon”
- Louis C., 1966. *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on stability on rock masses*. Imperial college, London, Rock Mechanics report No. 10, 90 pp
- Moye D. G., 1967. *Diamond drilling for Foundation Exploration*. Civil Engineering Transactions. presented at I.E.Aust. Site Investigation Symposium, September 1966 article



Mørk M. B. E., 2018. ”Muntlig kommunikasjon”

Norconsult. 2011. Ulriken tunnel - *Geologisk rapport for detaljplan*. I: UUT-00-A- 10006

NPRA, 2012. *Report No. 127. Major Research and Development Project: Modern Road Tunnels 2008-201*, NPRA, Oslo (Norwegian)

Palmstrøm A. mfl., 2003. *Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg* .I: Vegdirektoratet, Teknologiavdelingen, Oslo Publikasjon nr. 101.

Pusch R., Ramqvist, G.,Knutsson, Yang T., 2015. *The Role of Crystalline Rock for Disposal of High-Level Radioactive Waste (HLW)*. Oscarshamn, Sweden.

Sato T., Kikuchi T., Sugihara K., 1999. *In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation*. Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

SKB. 2015. *A demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone experience from the Äspö Hard Rock Laboratory*.

Snow D T, 1968. *Rock fracture spacings, openings and porosities*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.

Statens vegvesen og Jernbaneverket, 2015. *Vann- og frostsikringsløsning. Rapport fra evalueringsprosess vann- og frostsikring av tunneler*. Fellesprosjektet E6-Dovrebanen

Stille H., 2015. *Rock Grouting- Theories and Applications*. BeFo. Stockholm.

Stille H., Andersson J., Olsson L., 2003. *Information based design in rock engineering*. SveBeFo rapport 61. Swedish Rock Engineering Research.

Thörn J., Kvartsberg S., Runslätt E., Almfeldt S., Fransson Å., 2015. *Beräkningsverktyg för bergkaraktärisering vid injekteringsdesign-teori och användarhandledning*. BeFo Rapport 143. Stockholm

Tsang, C.F., F. Bernier, C. Davies. 2005. *Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

Tuttle K.J., 2016. *Modellering trykkforhold Ulriken tunnel*. Norconsult

Zimmermann R. W., Bodvarsson G. S., 1996. *Hydraulic conductivity of rock fractures. Transport in Porous Media*. Vol. 23, pp 1–30.

## **13.Vedlegg**

**Vedlegg1:** Oversikt over bergartene langs tunneltraseen mellom Arna og Bergen. (BaneNOR, 2017)

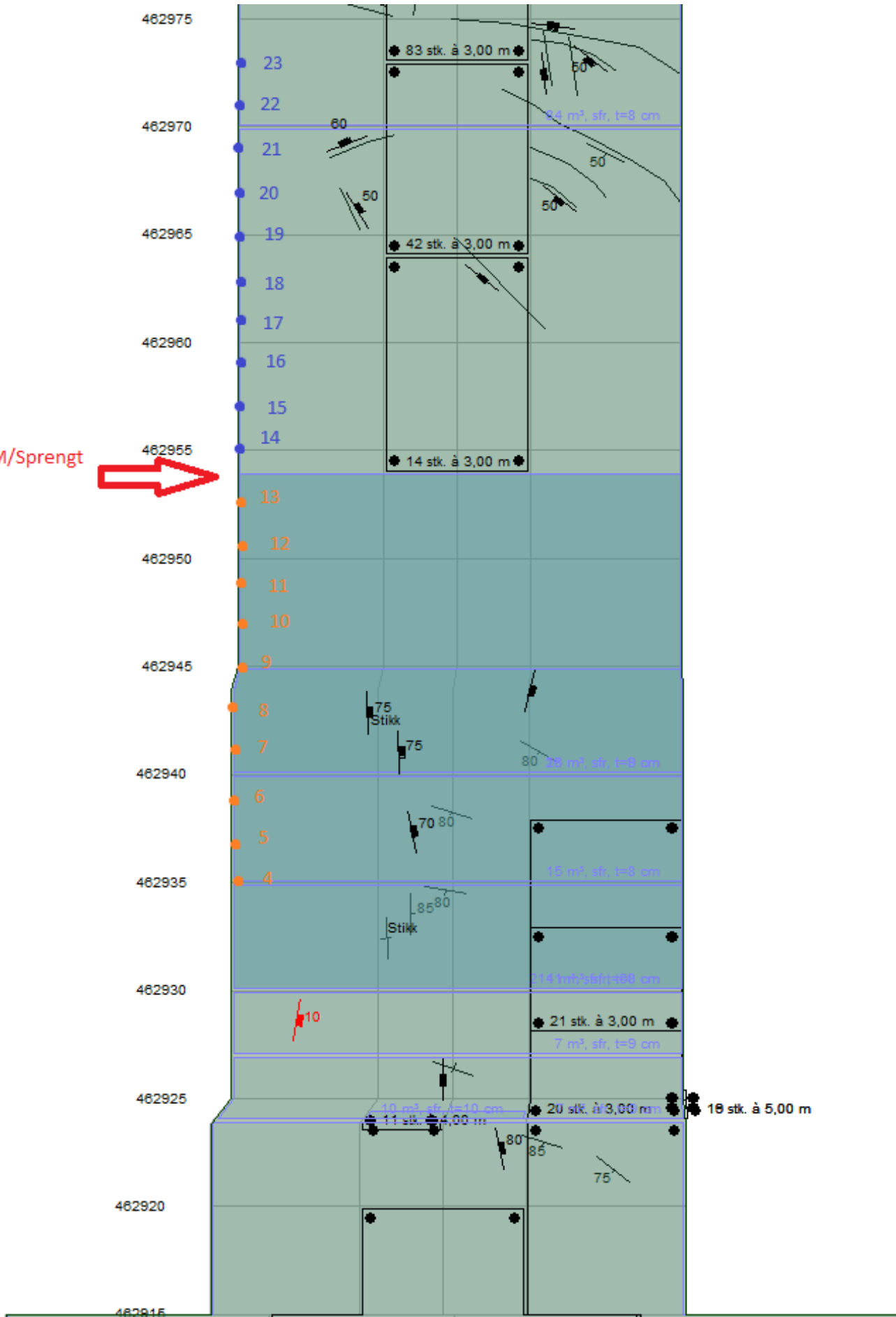




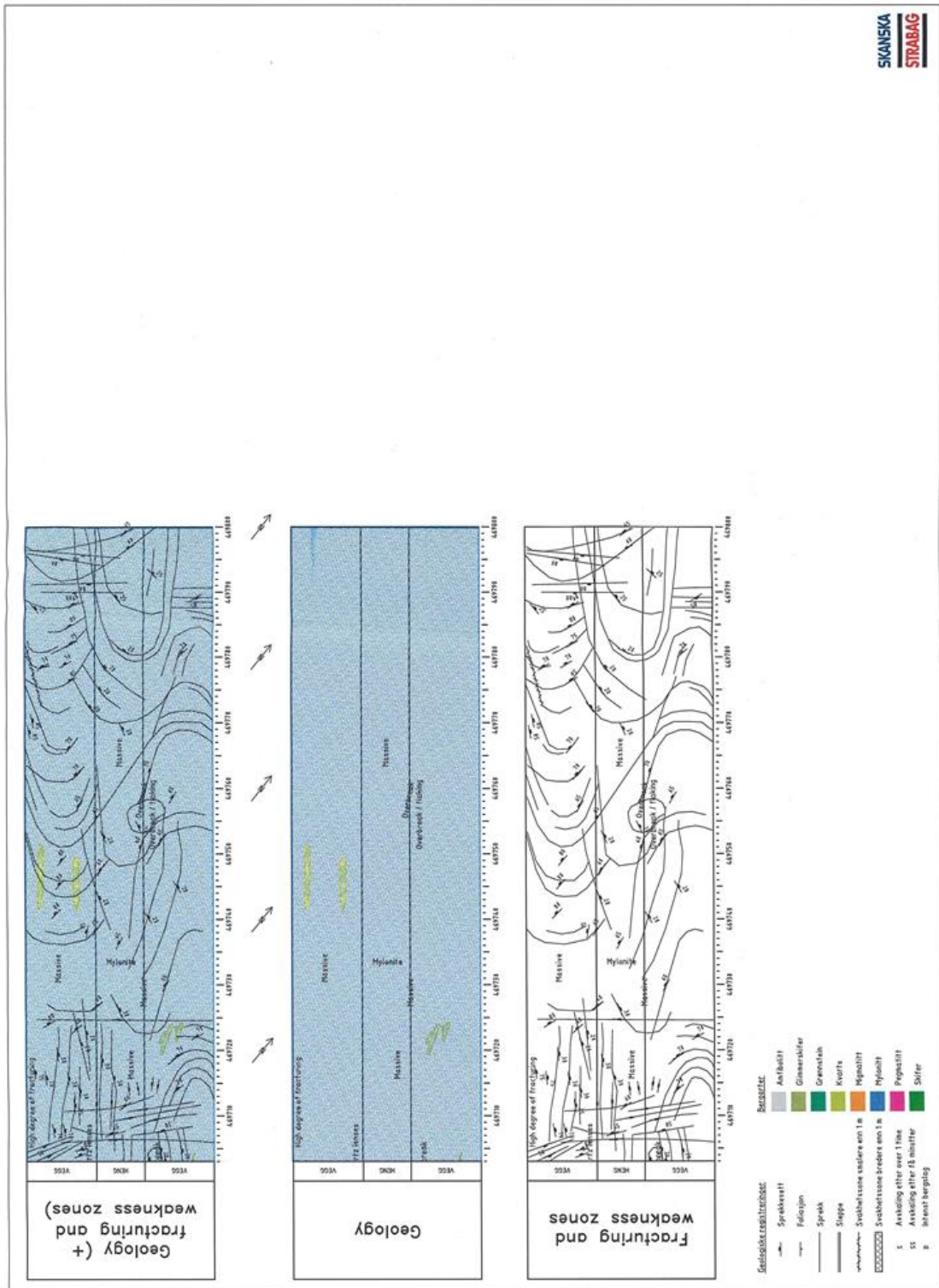


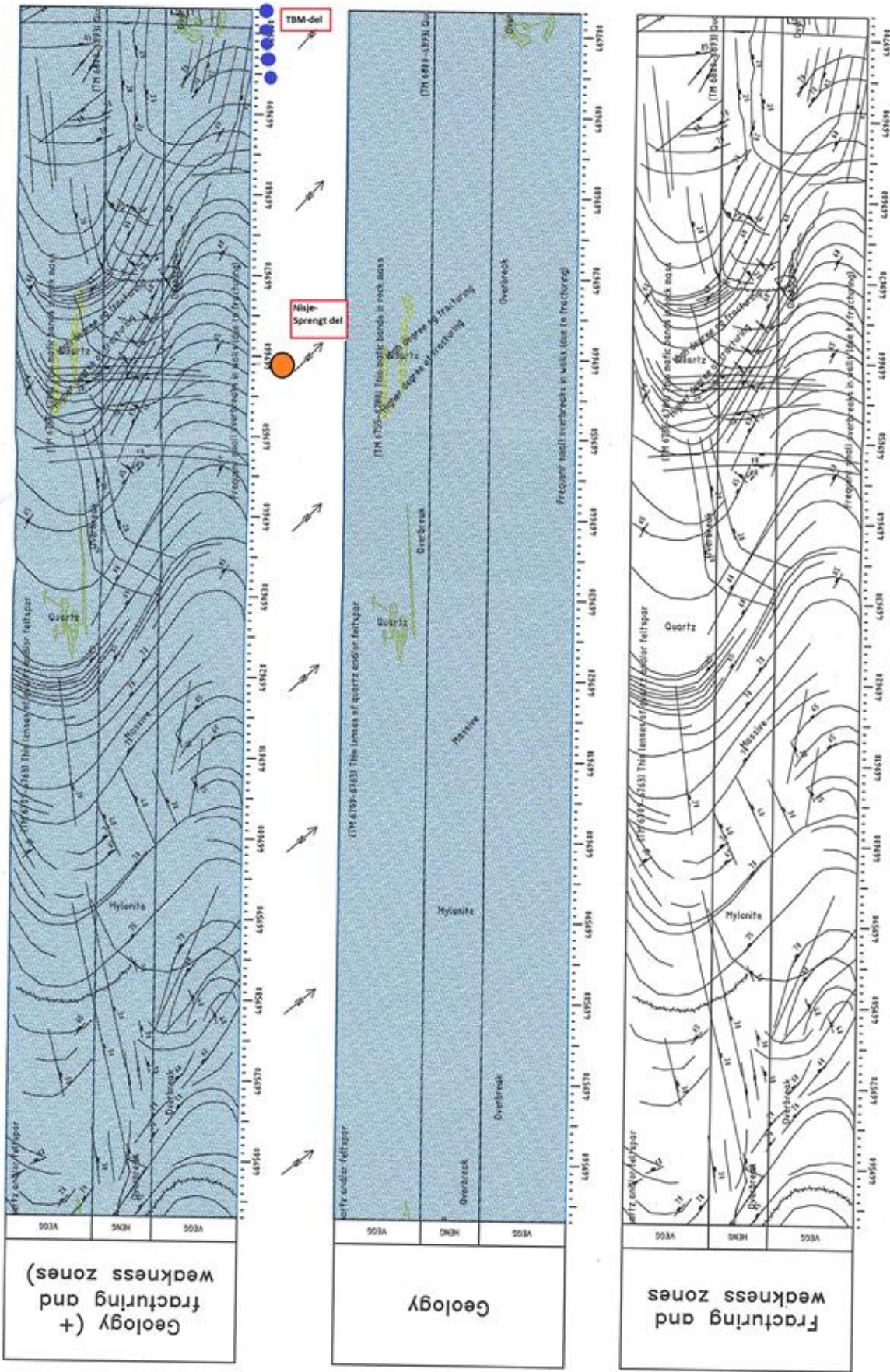
**Vedlegg 2:** Novapoint: Grensen mellom sprengt- og TBM-drevet tunnellop på Arna-siden.  
(Bane NOR, 2018)

Grense TBM/Sprengt



**Vedlegg 3 og Vedlegg 4: Sprekkekartlegging for nisje og TBM-del for Fløen-siden.**  
 (Skanska Strabag, 2018)





Geology (+  
fracturing and  
weakness zones)

Geology

Fracturing and  
weakness zones

- Bergartssvakhetsone:**
- Sprekkert
  - Felasjon
  - Sprekk
  - Slippe
  - Svakhetsone smalere enn 1 m
  - Svakhetsone bredere enn 1 m
  - S Arskaling etter over 1 time
  - SS Arskaling etter 15 minuttar
  - B Inest berglag
- Bergart:**
- Anfibolitt
  - Glimmerskifer
  - Grenstein
  - Kvarts
  - Mjølneitt
  - Mylonitt
  - Pegmatitt
  - Skifer



**Vedlegg 5-Vedlegg 25:** Borkjerner med sprekkeavstand og RQD. Inkludert vannstrømning for borkjerner hvor hydrauliske målinger ble utført.

4

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjærne[cm]	Borkjernebilde	Sprekkskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		
160		

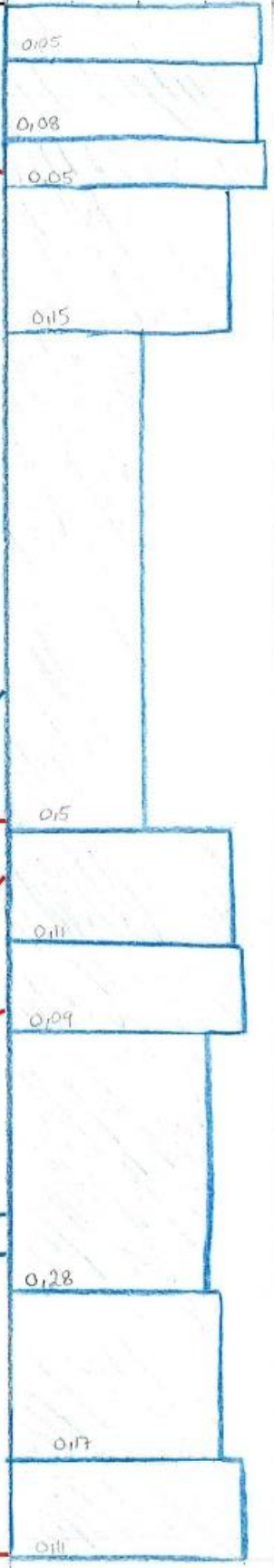
Sprekkeavstand  
 $d [ > 1m - 0m ]$

1m 0,75 0,50 0,25 0

RQD

[100-0]

100 75 50 25 0



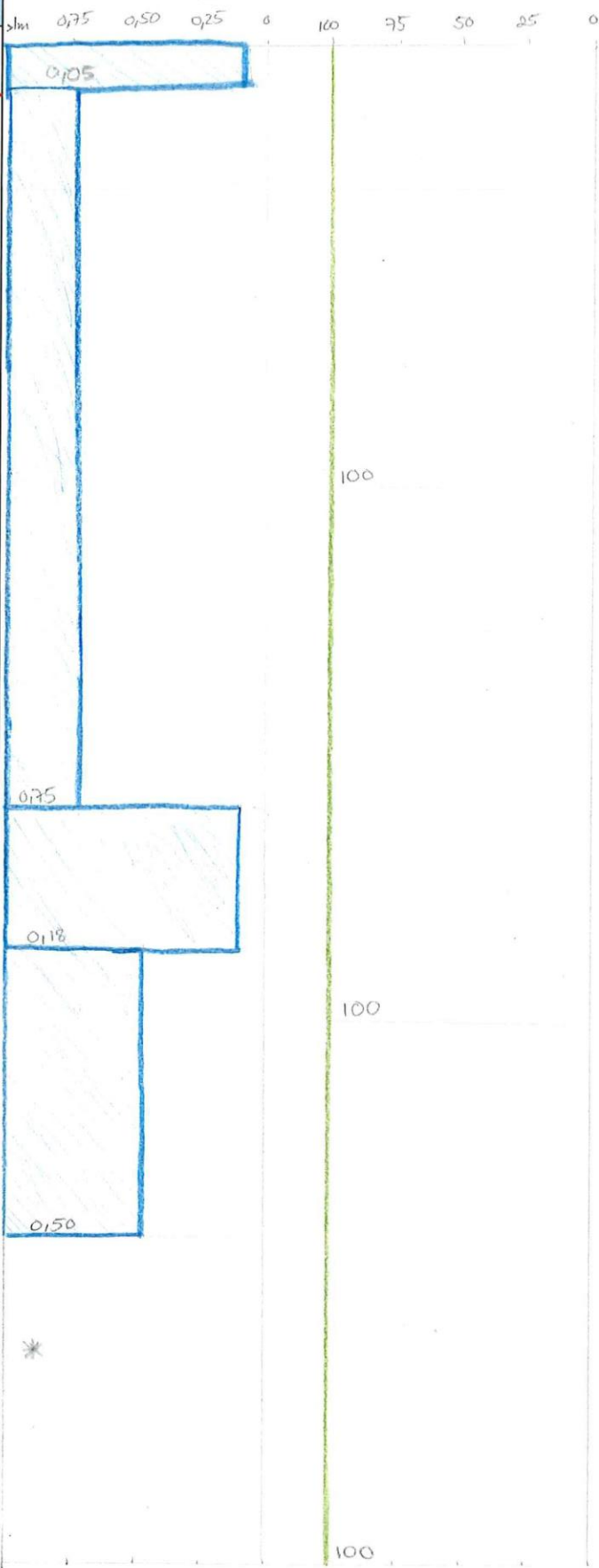


6)

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerne[cm]	Borkjernebilde	Sprekkskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		
160		
162,5		

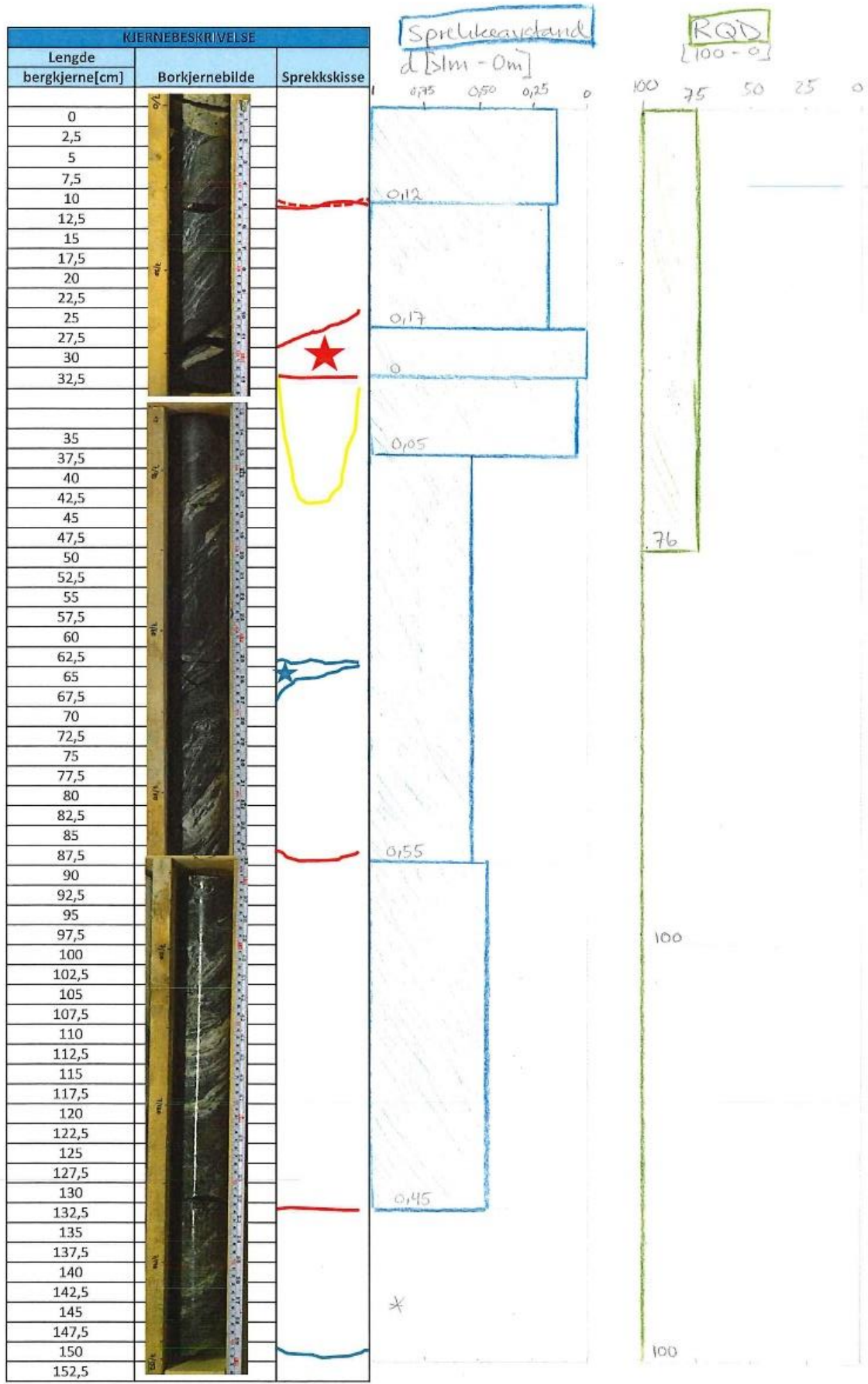
Sprekkeavstand  
d [51m - 0m]

RQD  
[100 - 0]





7



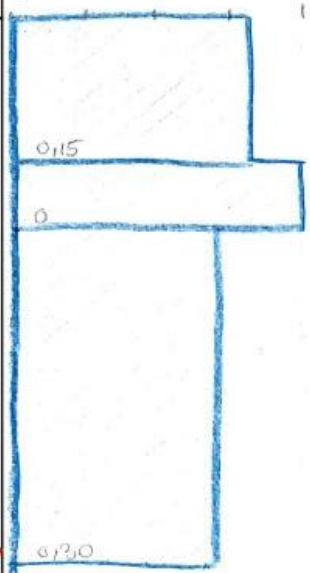
8

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerne[cm]	Borkjernebilde	Sprekkeskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		

Sprekkeavstand

d [1m - 0m]

0,75 0,50 0,25 0



RQD

[100-0]

100 75 50 25 0



>1m

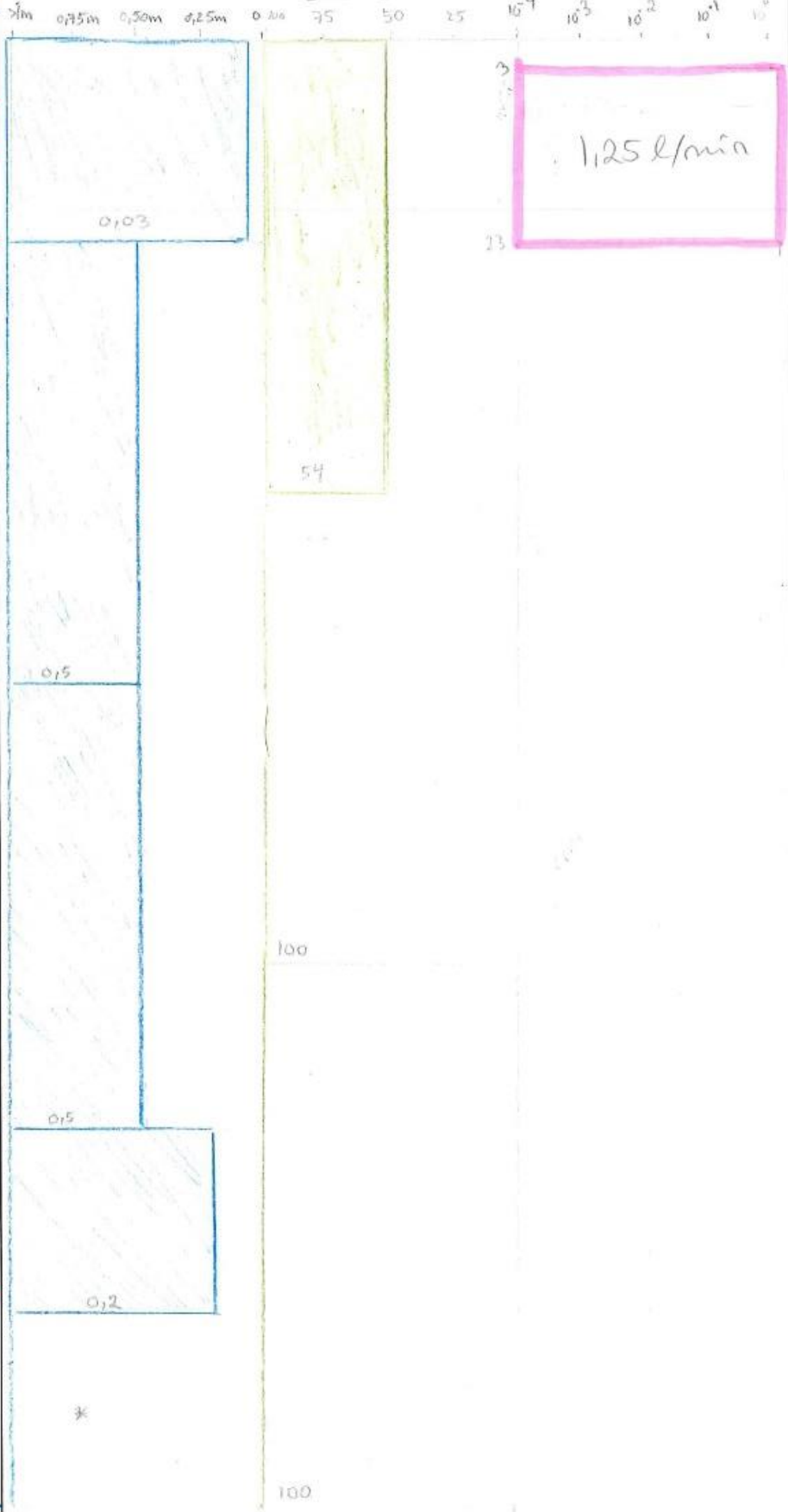
9

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerne[cm]	Borkjernebilde	Sprekkskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		
160		

Sprekkeavstand  
d [20m - 0m]

RQD  
[100-0]

Vannstrøm, Q  
[l/min]





10

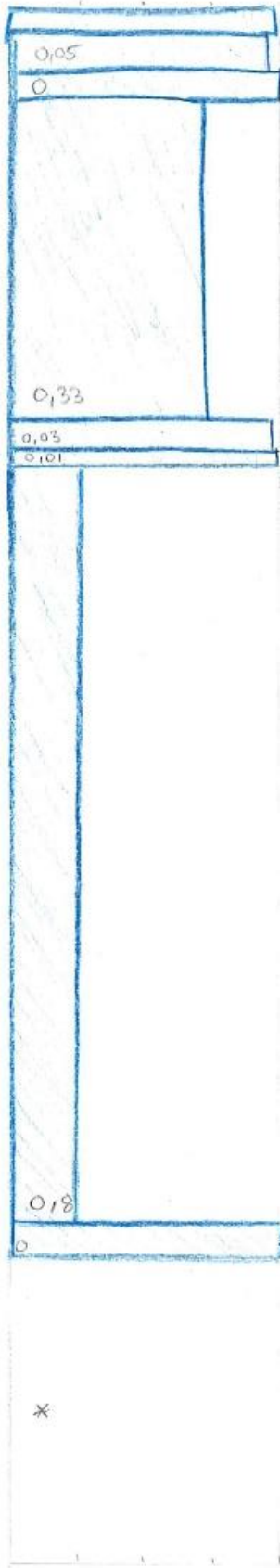
Sprekkeavstand  
 $d [m - 0m]$

RQD  
 $[100 - 0]$

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerner[cm]	Borkjernebilde	Sprekkeskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		
160		
162,5		
165		
167,5		

1 0,75 0,50 0,25 0

100 75 50 25 0



11

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde	Borkjernebilde	Sprekkskisse
bergkjerne[cm]		
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		

Sprekkeavstand

d [51m-0m]

>1m 0,75 0,50 0,25 0 100 75 50 25 0

RQD

[100-0]



\*

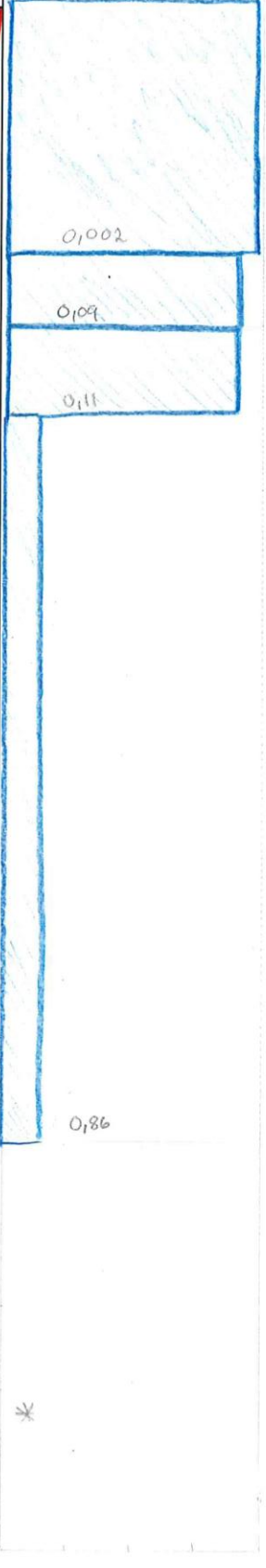
100

12

KJERNEBESKRIVELSE				
Lengde bergkjærne[cm]	Borkjærnebilde	Sprekkeskisse		
0				
2,5				
5				
7,5				
10				
12,5				
15				
17,5				
20				
22,5				
25				
27,5				
30				
32,5				
35				
37,5				
40				
42,5				
45				
47,5				
50				
52,5				
55				
57,5				
60				
62,5				
65				
67,5				
70				
72,5				
75				
77,5				
80				
82,5				
85				
87,5				
90				
92,5				
95				
97,5				
100				
102,5				
105				
107,5				
110				
112,5				
115				
117,5				
120				
122,5				
125				
127,5				
130				
132,5				
135				
137,5				
140				
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				
172,5				
175				
177,5				

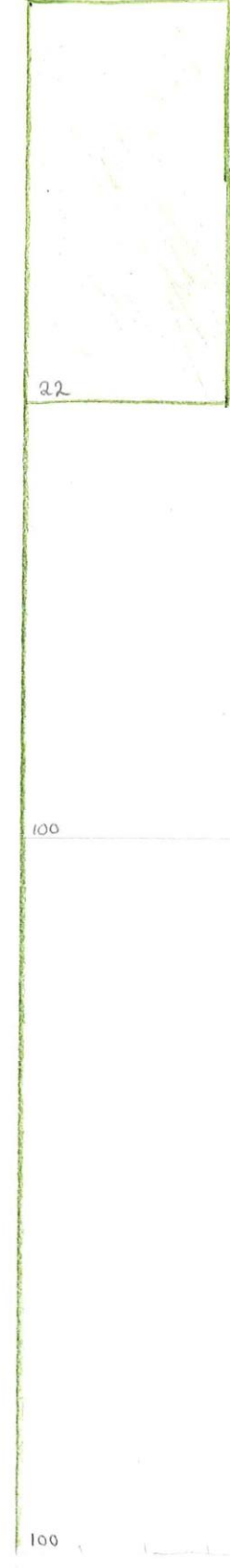
Sprekkeavstand  
d [m - 0m]

0,75 0,50 0,25 0



RQD  
[100-0]

100 75 50 25



Vannstrøm  
Q [l/min]

$10^4$   $10^3$   $10^2$   $10^1$   $10^0$





KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjærne[cm]	Borkjærnebilde	Sprekkeskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		
160		
162,5		

Sprekkeavstand

d [ $>1m - 0m$ ]



RQD

[100-0]



>1m

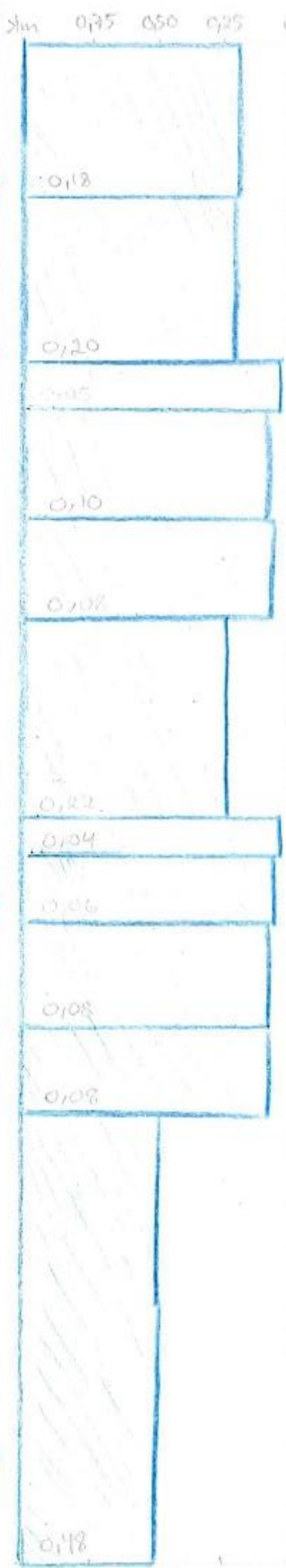
\*

100

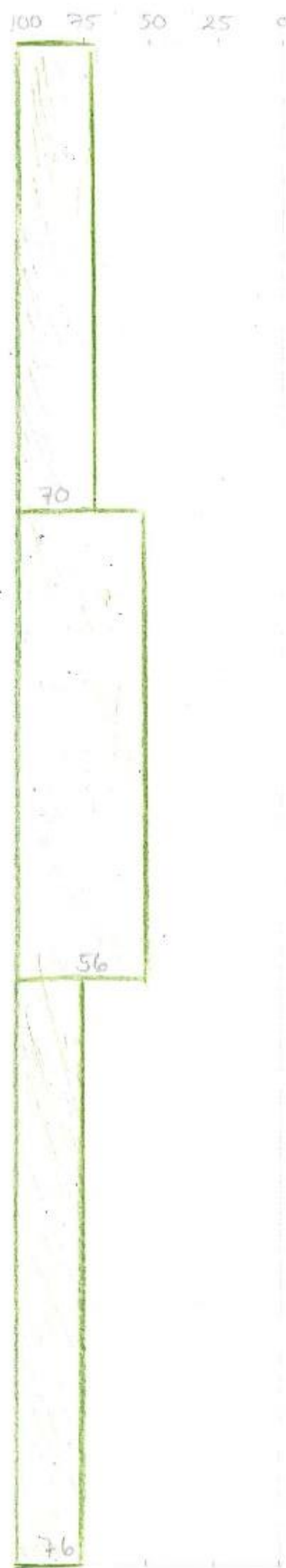
100

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerner[cm]	Borkjernebilde	Sprekkskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		
160		
162,5		
165		

Sprekkeavstand  
d [cm - cm]



RQD  
[100-0]



15

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerner[cm]	Borkjernebilde	Sprekkeskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		

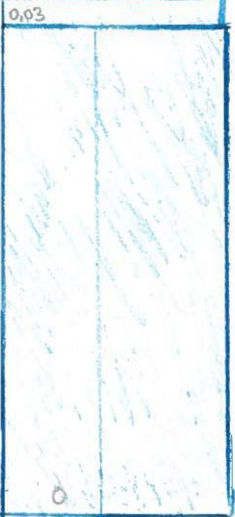
Sprekkeavstand

d  $\geq$  1m - 0 m

0,75 0,50 0,25 0

RQD

100 75 50 25 0



94

100

100

\*



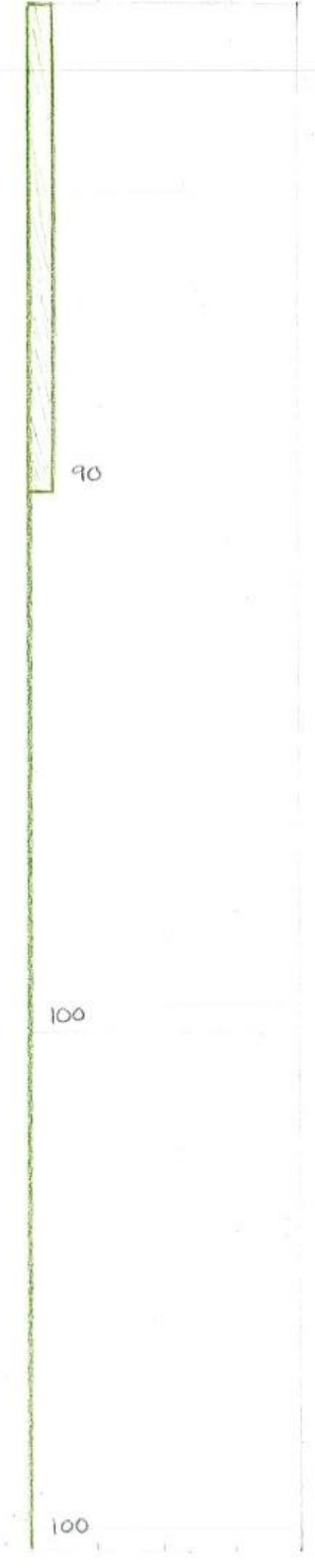
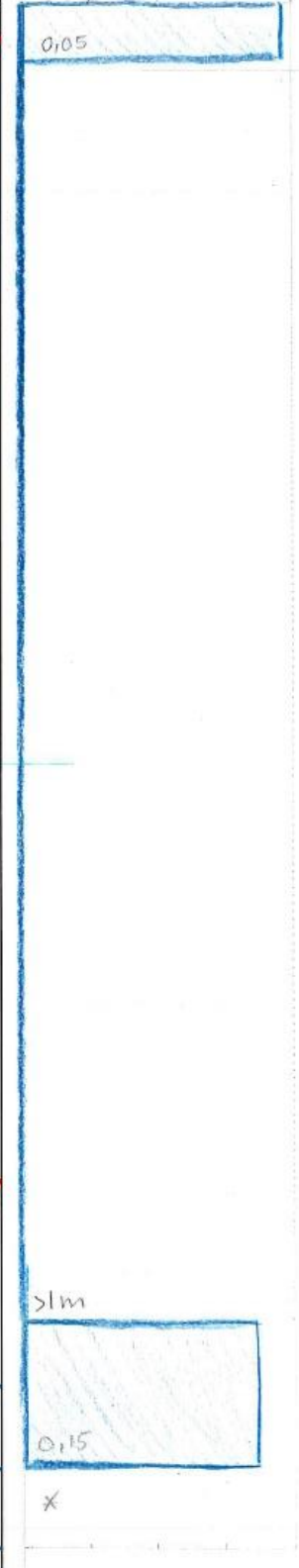
KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjærne[cm]	Borkjærnebilde	Sprekkskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		

Sprekkeavstand  
d [1m - 0m]

RQD  
[100 - 0]

>1m 0,75 0,50 0,25 0

100 75 50 25 0





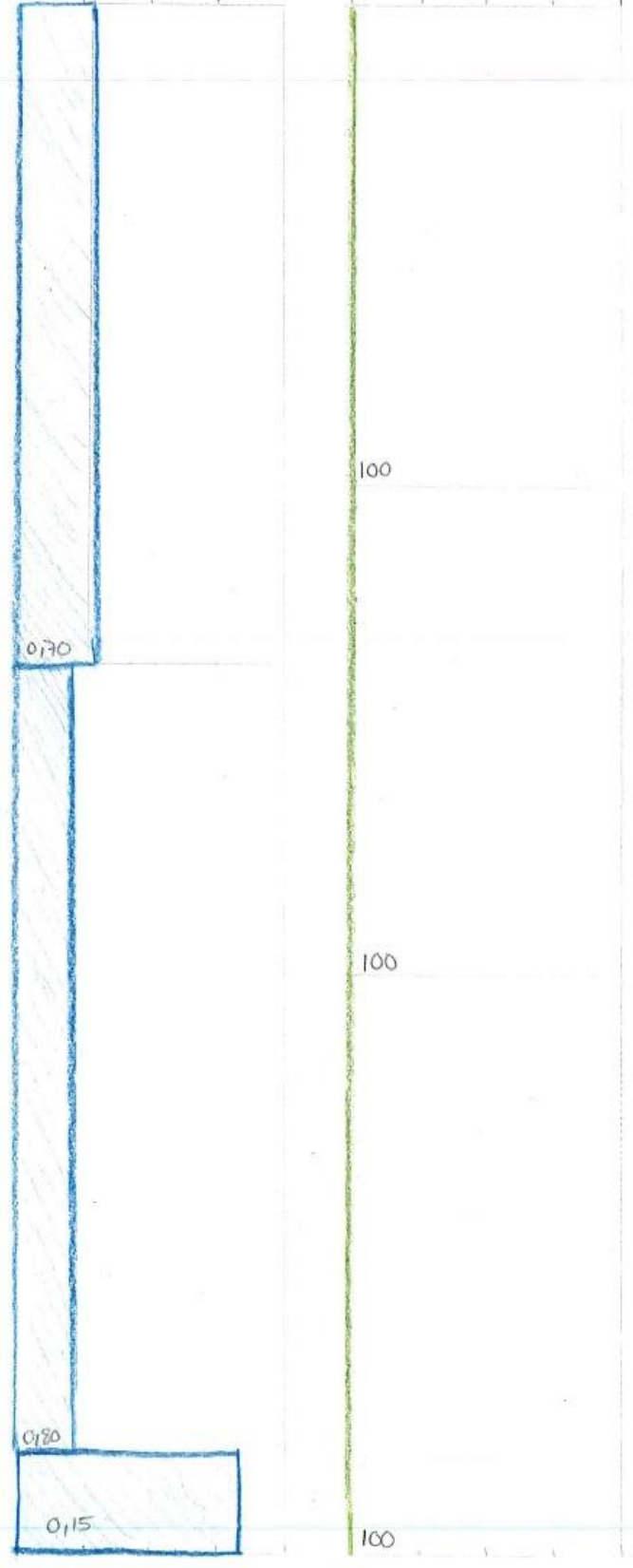
17

KJERNEBESKRIVELSE				
Lengde	Borkjernebilde	Sprekkeskisse		
bergkjerne[cm]				
0				
2,5				
5				
7,5				
10				
12,5				
15				
17,5				
20				
22,5				
25				
27,5				
30				
32,5				
35				
37,5				
40				
42,5				
45				
47,5				
50				
52,5				
55				
57,5				
60				
62,5				
65				
67,5				
70				
72,5				
75				
77,5				
80				
82,5				
85				
87,5				
90				
92,5				
95				
97,5				
100				
102,5				
105				
107,5				
110				
112,5				
115				
117,5				
120				
122,5				
125				
127,5				
130				
132,5				
135				
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				
155				
157,5				
160				

Sprekkeavstand  
d [1m - 0m]

RQD  
[100 - 0]

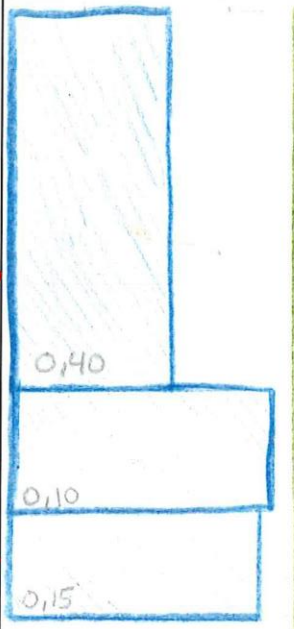
1m 0,75 0,50 0,25 0 100 75 50 25 0



KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerner[cm]	Borkjernebilde	Sprekkeskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		

Sprekkeavstand

0,75 0,50 0,25

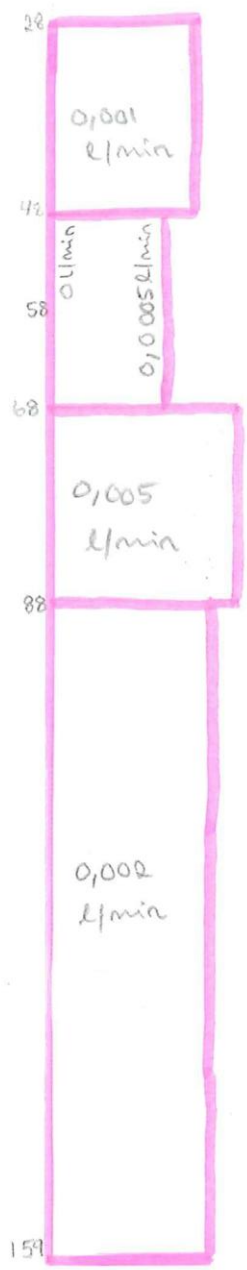


RQD [100-Q]

100  
100  
100

Vannstrøm Q [l/min]

$10^{-5}$   $10^{-4}$   $10^{-3}$   $10^{-2}$   $10^{-1}$

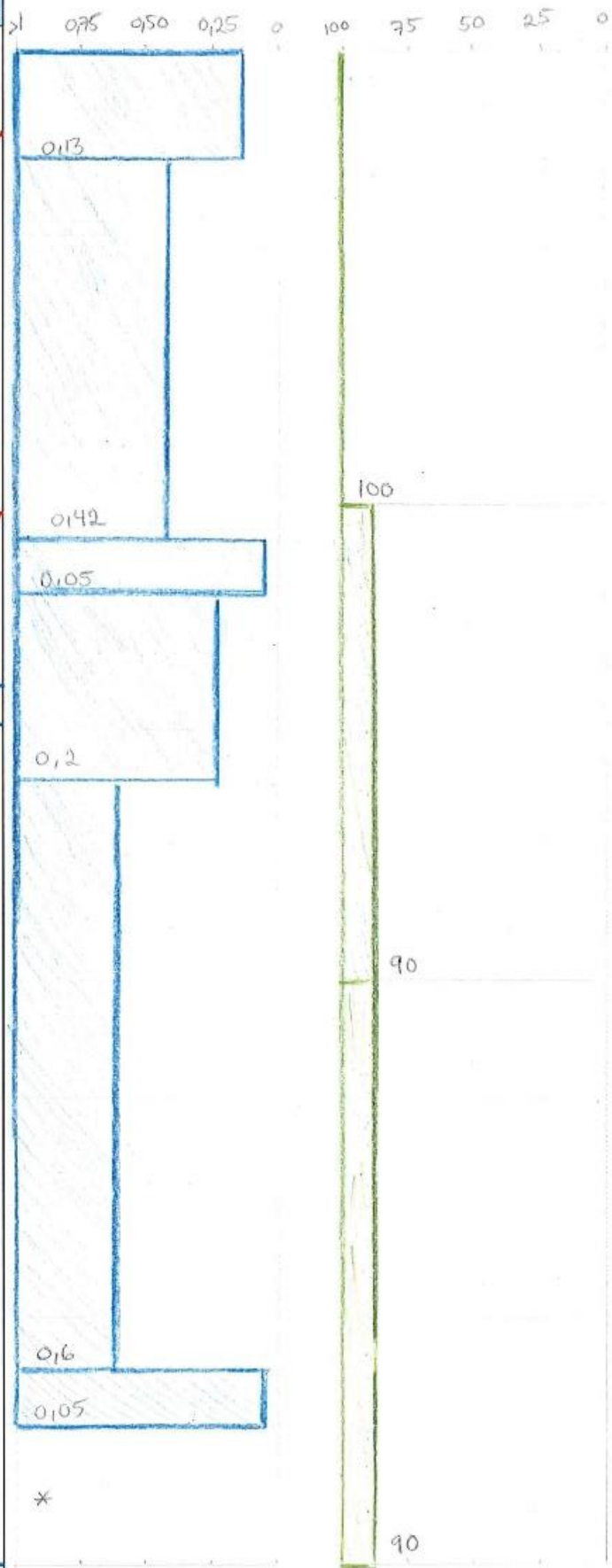


\*

KJERNEBESKRIVELSE				
Lengde bergkjærne[cm]	Borkjærnebilde	Sprekkeskisse		
0				
2,5				
5				
7,5				
10				
12,5				
15				
17,5				
20				
22,5				
25				
27,5				
30				
32,5				
35				
37,5				
40				
42,5				
45				
47,5				
50				
52,5				
55				
57,5				
60				
62,5				
65				
67,5				
70				
72,5				
75				
77,5				
80				
82,5				
85				
87,5				
90				
92,5				
95				
97,5				
100				
102,5				
105				
107,5				
110				
112,5				
115				
117,5				
120				
122,5				
125				
127,5				
130				
132,5				
135				
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				

Sprekkeavstand  
d [ $>1m - 0m$ ]

RQD  
[100 - 0]





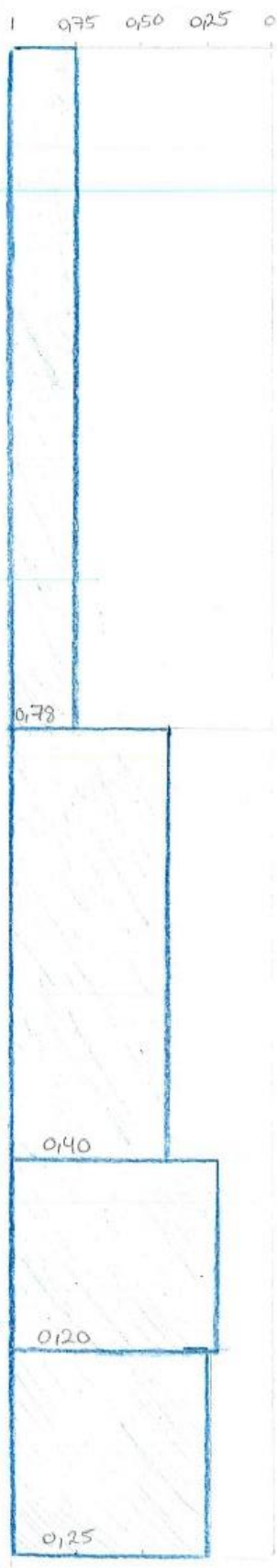
20

Sprekkeavstand  
d [Bm - Om]

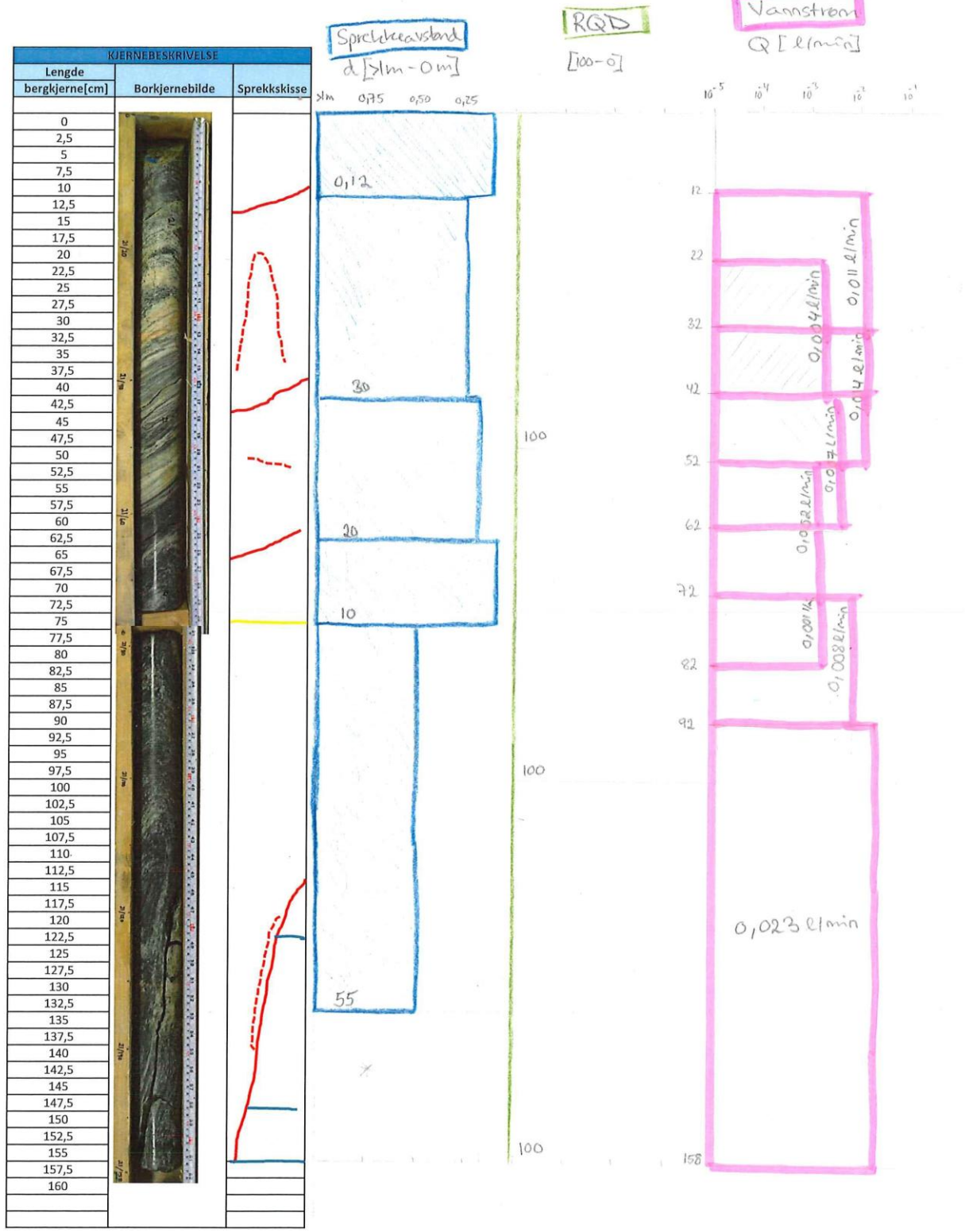
RGD

[100-0]

KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerner[cm]	Borkjernebilde	Sprekkeskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		
155		
157,5		
160		
162,5		



21



22

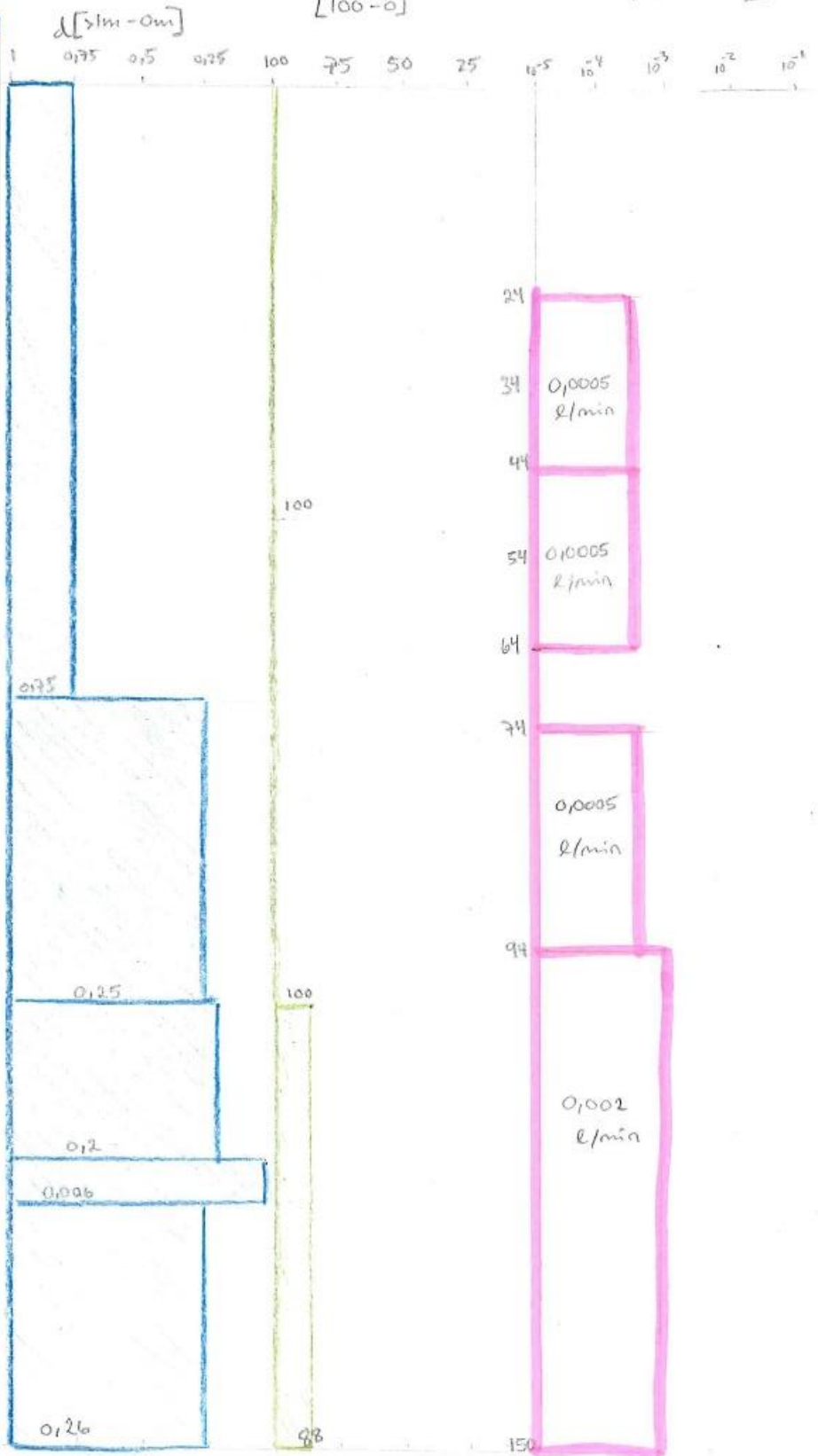
Sprekkeavstand

RQD

Vannstrøm

Q [l/min]

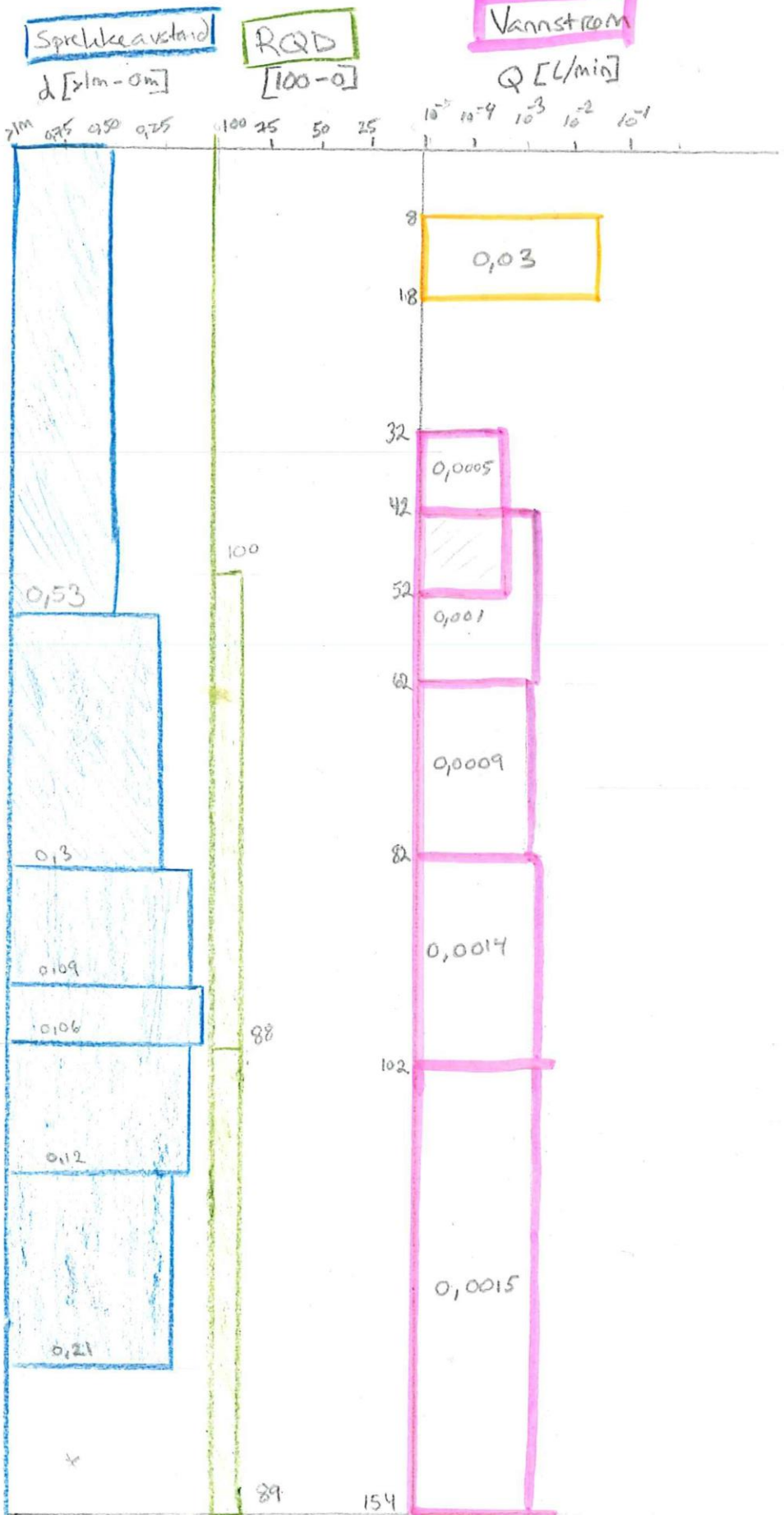
IGERNEBESKRIVELSE		
Lengde bergkjerne[cm]	Borkjernebilde	Sprekkeskisse
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		





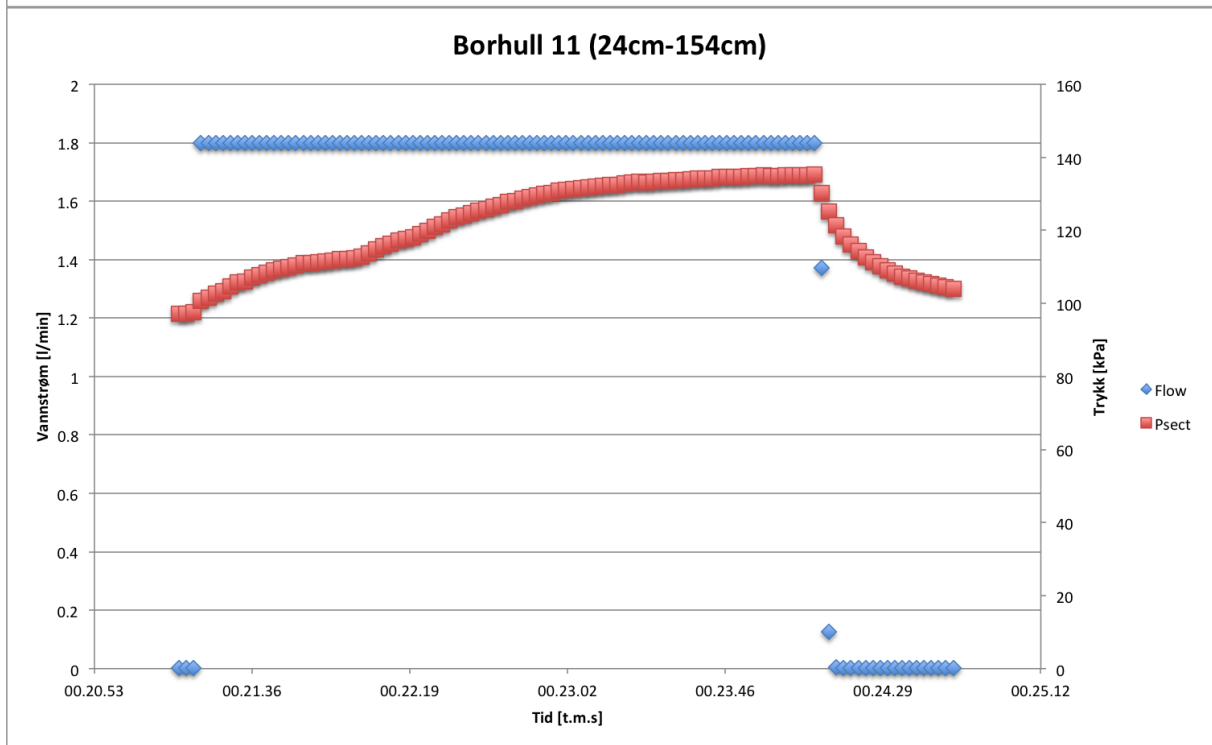
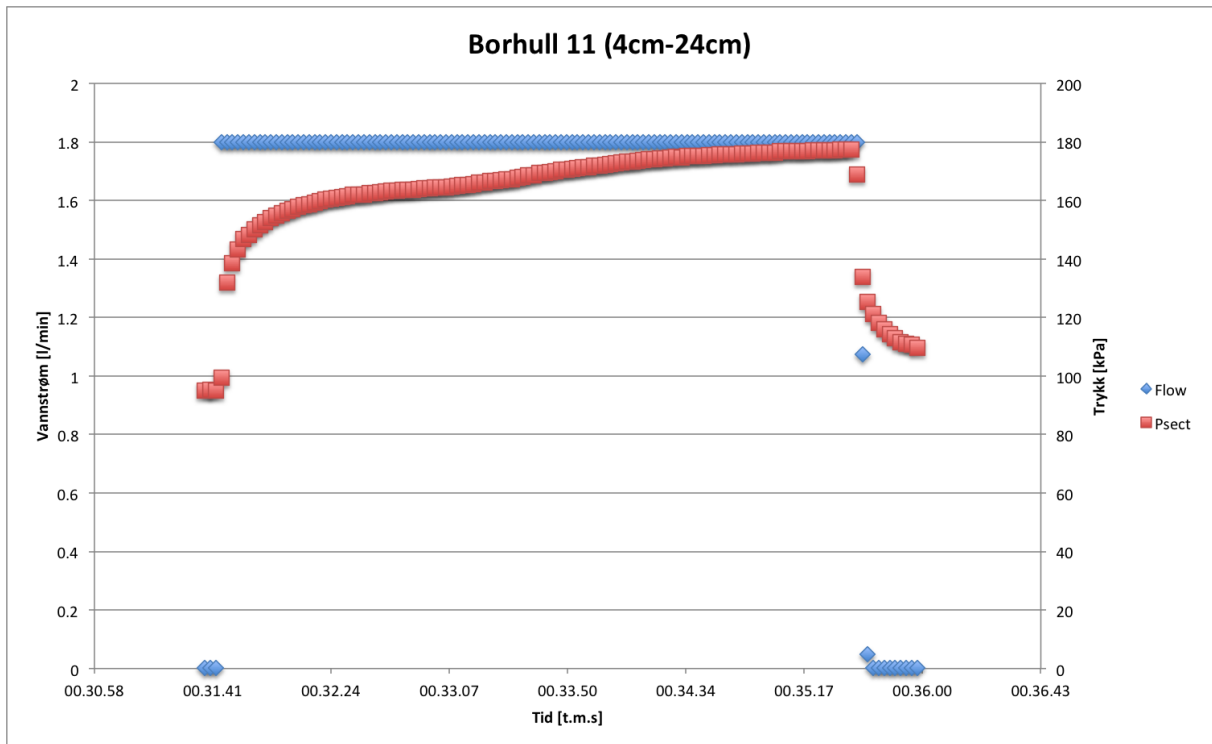
23

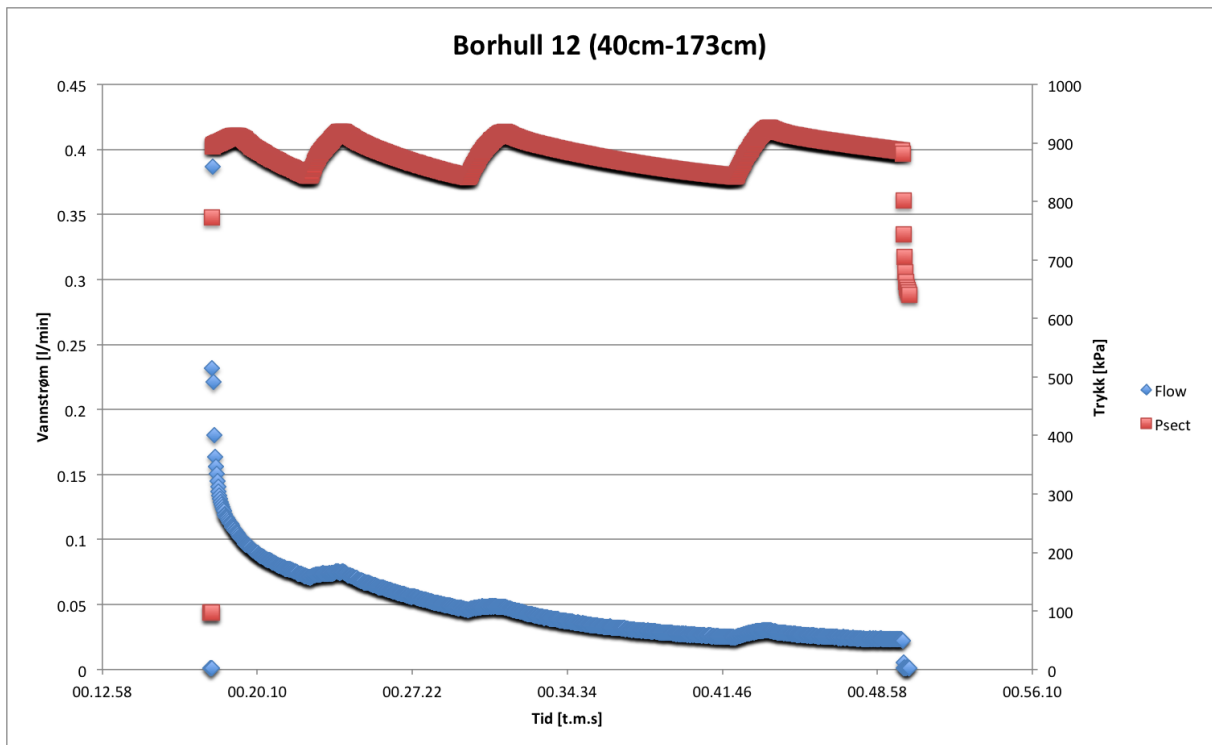
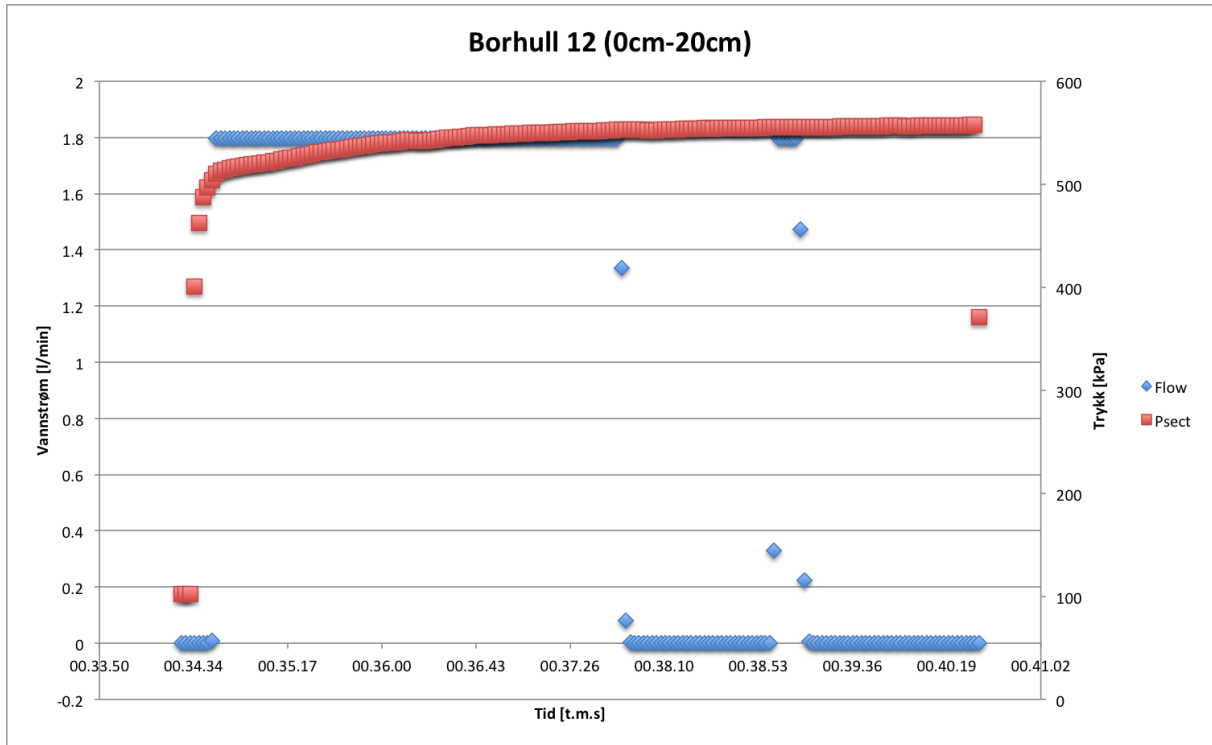
KJERNEBESKRIVELSE		
Lengde	Borkjernebilde	Sprekkskisse
bergkjerne[cm]		
0		
2,5		
5		
7,5		
10		
12,5		
15		
17,5		
20		
22,5		
25		
27,5		
30		
32,5		
35		
37,5		
40		
42,5		
45		
47,5		
50		
52,5		
55		
57,5		
60		
62,5		
65		
67,5		
70		
72,5		
75		
77,5		
80		
82,5		
85		
87,5		
90		
92,5		
95		
97,5		
100		
102,5		
105		
107,5		
110		
112,5		
115		
117,5		
120		
122,5		
125		
127,5		
130		
132,5		
135		
137,5		
140		
142,5		
145		
147,5		
150		
152,5		

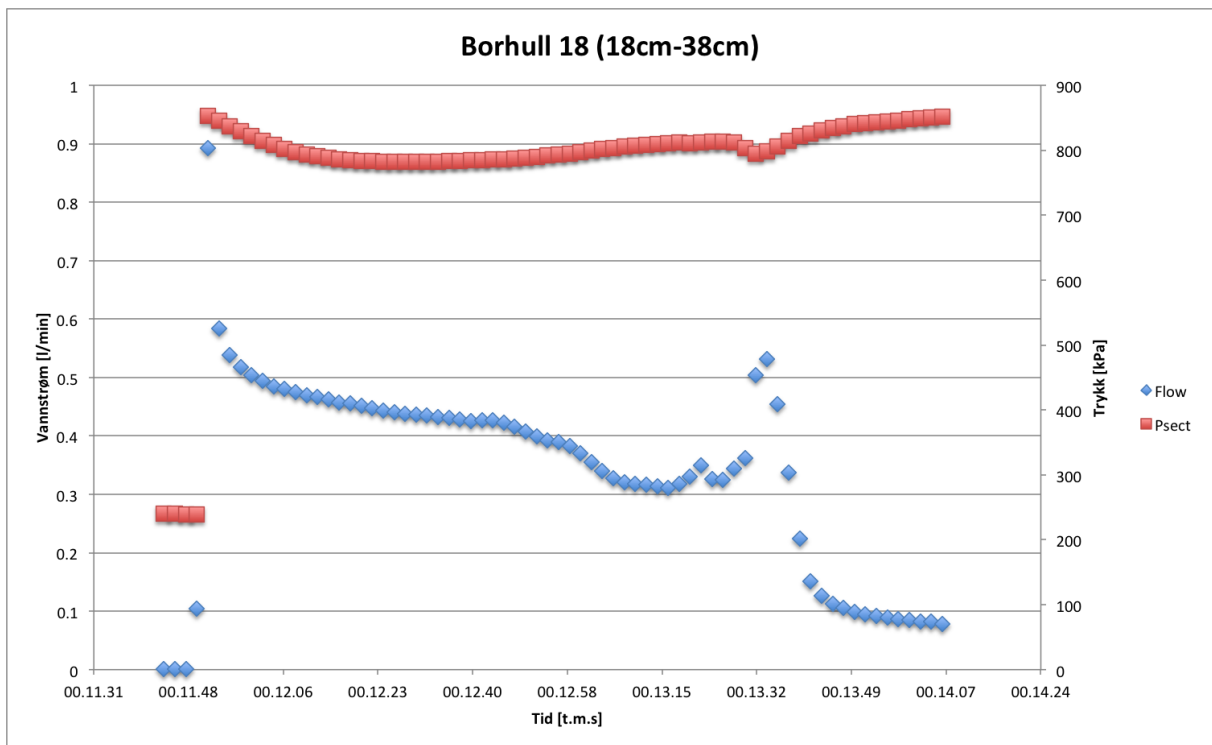
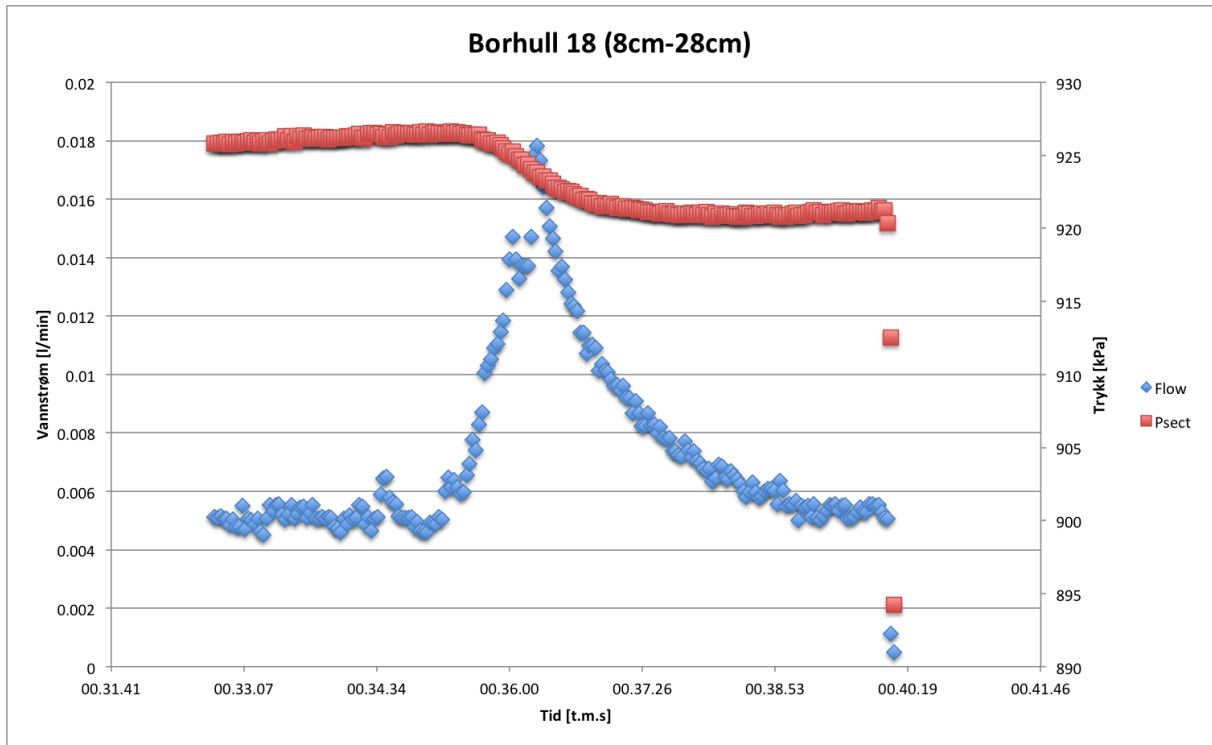


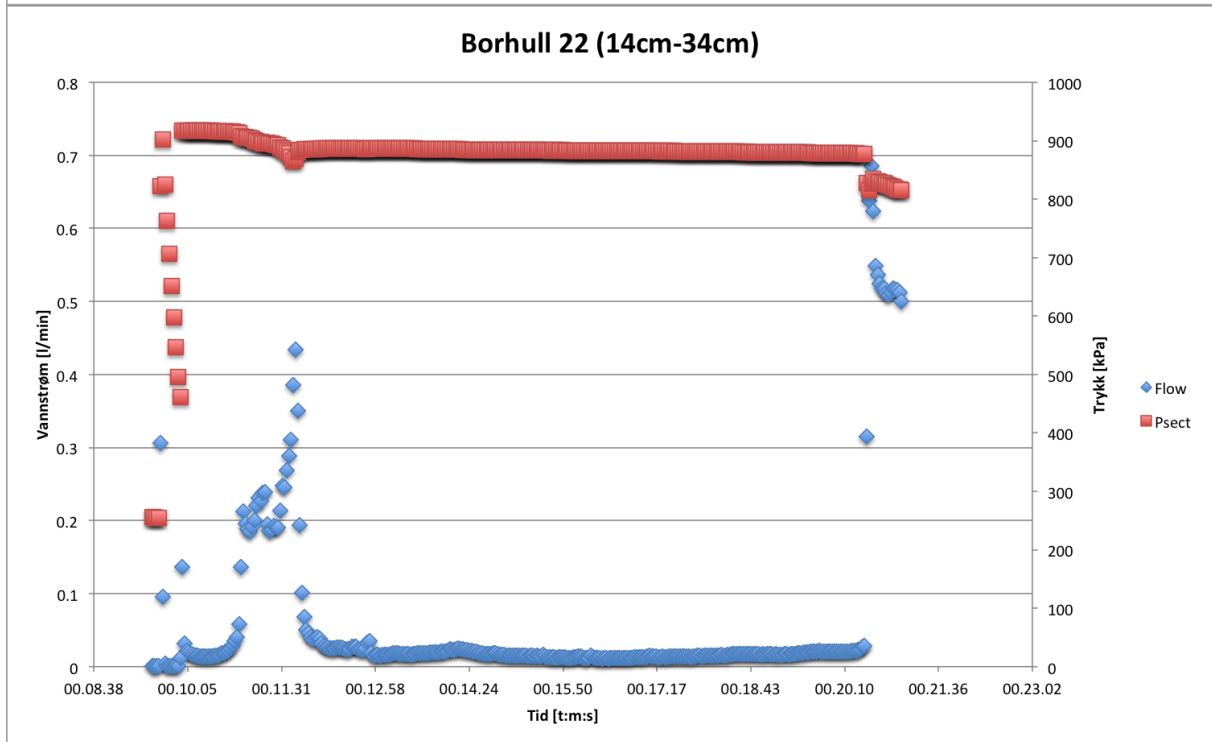
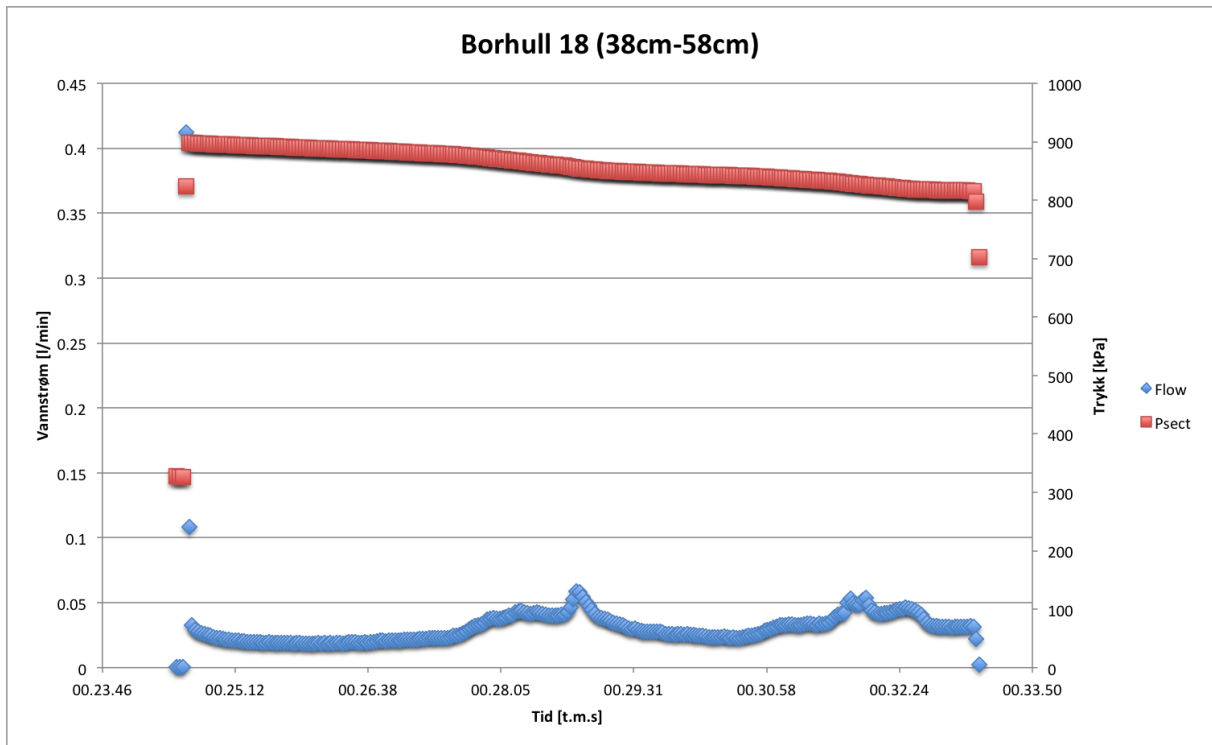


**Vedlegg 26- Vedlegg 35:** Hydrauliske målinger som ikke ga gyldige resultater

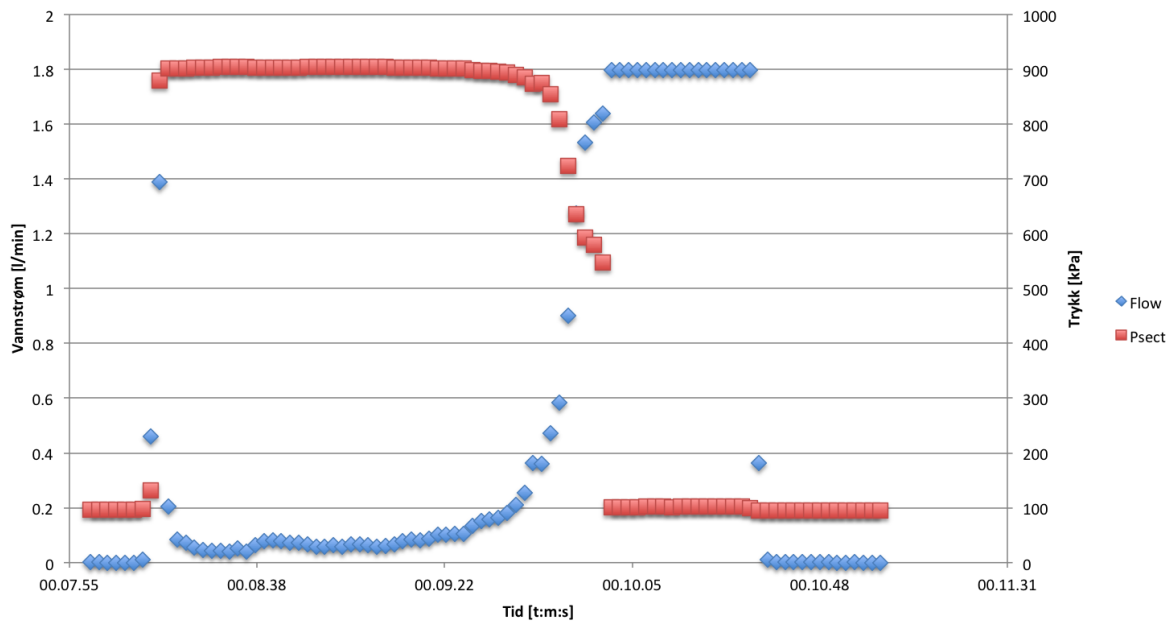




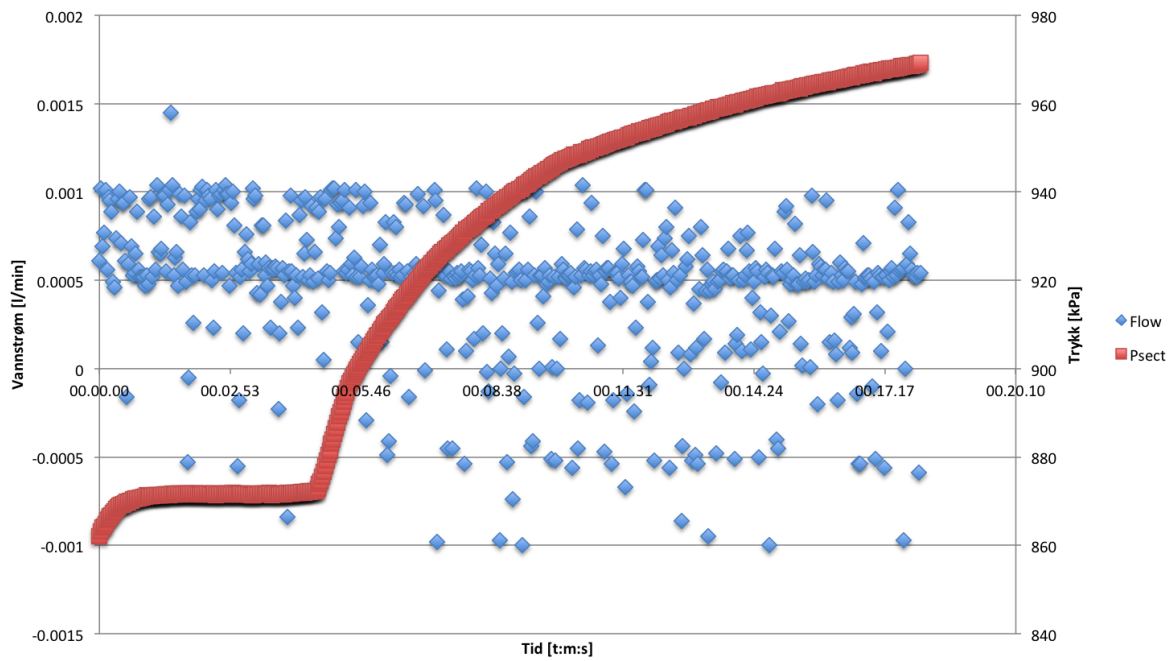




### Borhull 23(22cm-42cm)



### Borhull 23(42cm-52cm)





**Vedlegg 36 og vedlegg 37: Utregninger fra laboratoriumsarbeid**

Prøver Arna-siden							
Prøve nummer	Lengde [mm]	Gjennomsnittsdiameter [mm]	L/D	Vekt [g]	Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	Gangtid [μs]	Lydhastighet [m/s]
1	154,77	68,21	2,21	1556,74	2853	24,9	6215,66
2	164,45	68,01	2,42	1718,28	2964	30,8	5339,29
3	164,43	67,98	2,42	1670,36	2881	37,9	4338,52
4	164,66	67,99	2,42	1674,65	2885	36,8	4474,46
5	163,90	68,31	2,40	1699,57	2941	31,8	5154,09
6	165,48	68,36	2,42	1704,47	2921	36,7	4508,99
7	164,16	68,22	2,41	1656,96	2863	35,4	4637,29
8	164,69	68,13	2,42	1679,02	2892	30,4	5417,43
9	164,93	68,34	2,41	1714,51	2948	34,4	4794,48
10	165,52	68,43	2,42	1695,86	2906	31,8	5205,03
11	165,53	68,45	2,42	1777,56	3046	27,6	5997,46
12	165,30	68,36	2,42	1718,37	2949	35,7	4630,25
13	165,45	68,36	2,42	1911,15	3276	25,3	6539,53
14	153,21	68,43	2,24	1630,84	3019	33,6	4559,82
15	164,96	68,44	2,41	1830,16	3147	37,7	4375,60
16	165,59	68,47	2,42	1746,12	2991	28,7	5769,69
17	163,95	68,88	2,38	1782,71	3084	31,0	5288,71
18	165,50	68,75	2,41	1698,29	2911	26,8	6175,37

Prøver Fløen-siden							
Prøvenu mmer	Lengde [mm]	Gjennomsnitts diameter [mm]	L/D	Vekt [g]	Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	Gangtid [μs]	Lydhastighet [m/s]
19	163,74	67,03	2,44	1551,23	2685	30,9	5299
20	165,33	67,56	2,45	1584,32	2673	33,4	4950
21	155,95	67,77	2,30	1501,8	2670	30,4	5130
22	137,22	67,91	2,02	1324,75	2665	26,4	5198
23	137,28	67,52	2,03	1314,87	2675	27,4	5010
24	176,04	67,73	2,56	1693,67	2670	32,9	5351
25	148,38	67,61	2,19	1416,38	2659.	28,9	5134
26	165,36	68,06	2,43	1597,47	2662	30,4	5439
27	128,39	68,06	1,89	1241,86	2658	24,9	5156
28	154,84	67,86	2,28	1494,99	2669	29,4	5267
29	142,53	68,04	2,09	1378,8	2660	27,4	5202
30	145,91	67,99	2,15	1407,94	2658	29,3	4980

## Vedlegg 38 og Vedlegg 39: Foliassjonsvinkel og bruddforklaring for kjerner i UCS-test

### Beskrivelse av brudd for kjerner fra Arna-siden.

Kjernenummer	Foliassjonsvinkel [°]	Type brudd
1	14	Uregelmessig brudd
2	27-Tydelig foliasjon	Bruddet går ikke helt langs med foliasjonen.
3	41-Mindre tydelig foliasjon	Brudd i foliasjonen
4	36-foliasjon	Brudd i foliasjonen
5	40-tydelig foliasjon	Brudd i foliasjonen
6	45-tydelig foliasjon	Gikk tidlig i brudd. Svakt foliasjonsplan. Kanskje vannførende, har et belegg.
7	10-kan observere antydning til en lagdeling-ellers utrolig homogen og hvit	-
8	14-granatinnhold i foliasjonen	-
9	43-tydelig foliasjon	Brudd i foliasjon
10	45-ikke homogen-har noen øyer i det hvite med glimmer	Rart brudd
11	32-mørke-ser en foliasjon i glimmeret	Brudd i en svakhet, ikke i foliasjonen
12	Tykke bånd med glimmer- i tillegg til brune lagdelinger	Brudd i foliasjonen
13	Ser ingen lagdeling	-
14	Parallelt med aksene, Amfibol-”øyer” omkranset av granat som har en trend.	Brudd langsmed ”øyene”
15	Parallelt med aksene, ikke like konsekvent som for nr. 14	Brudd parallelt med forvitringen
16	31	Uforventet brudd-går ikke langs med foliasjonen-grafene ble rare og ble ganske horisontale på slutten
17	21	Uforventet brudd
18	-	Brudd i en svakhet

**Beskrivelse av brudd for kjerner fra Fløyen-siden.**

Kjernenummer	Foliasjonsvinkel [°]	Type brudd
19	24	Brudd i foliasjon og langs med aksene. Antar bruddet gikk først i foliasjonen.
20	26	Brudd i foliasjon og langs med aksene. Antar bruddet gikk først i foliasjonen.
21	20	Brudd i foliasjonen.
22	19	Brudd utenfor foliasjonen.
23	21	Brudd i foliasjon
24	28	Brudd i foliasjonen. Bruddet er etappevis, noe som tyder på at bruddvinkelen egentlig er brattere.
25	25	Brudd i foliasjonen.
26	30	Brudd i foliasjonen
27	29	Brudd parallelt med foliasjonen
28	23	Gikk i brudd ved flere steder.
29	22	Gikk tidlig i brudd. Er en svakhet i kjernen fra før. Kjernen var ikke intakt.
30	27	Brudd i foliasjonen.