

Lars Lid Nordø

Skalerte hydrauliske splitte- og jekkeforsøk i laboratorium

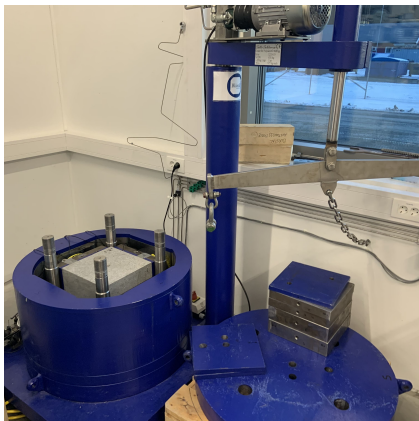
Masteroppgave i Tekniske geofag

Veileder: Bjørn Nilsen

Juni 2020

Lars Lid Nordø

Skalerte hydrauliske splitte- og jekkeforsøk i laboratorium



Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Bjørn Nilsen
Juni 2020

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



Kunnskap for en bedre verden



MASTEROPPGAVE

Oppgavebeskrivelse

Kandidatens navn: Lars Lid Nordø

Oppgavens tittel: SKALERTE HYDRAULISKE SPLITTE- OG JEKKEFORSØK I LABORATORIUM

English title: Scaled hydraulic fracturing and jacking tests in laboratory

Utfyllende tekst:

1.

Formålet med denne masteroppgaven er å bistå ved pågående laboratorieforsøk tilknyttet forskningssenteret HydroCen, hvor det utføres skalerte hydrauliske splitte- og jekkeforsøk. Forsøkene utføres på bergartsblokker som ved hjelp av hydrauliske jekker gis en innspenning for å simulere spenningsforholdene i dypet i en bergmasse. Ved slike forsøk i kontrollert bergmasse kan man styre bl.a. spenningsforhold og vanntrykk for å simulere effekten av ulike suboptimale testforhold.

Innledningsvis i arbeidet skal det gjennomføres opplæring på aktuelt utstyr, med spesiell fokus på forsøksprosedyrer og HMS. I samarbeid med medveileder skal det så gjøres utvalgte bergmekaniske tester på aktuelle bergartsprøver. Anvendte testprosedyrer skal beskrives og diskuteres. Hovedvekt i arbeidet skal legges på undersøkelse og analyse av testparametres effekt på testresultat, med spesiell fokus på:

- Tolkning av splitte- og jekkeforsøk ved akustisk emisjon (AE) overvåkning.
- Undersøkelse av karakteren til induserte sprekker.
- Sammenlikning av ulike testmetoder for splitte/jekkeforsøk i detektering av minste hovedspenning.

2.

Oppgaven gjennomføres som del av aktiviteten innenfor FME HydroCen, med ingeniørgeolog/PhD-stipendiat Henki Ødegaard som medveileder.

Studieretning: Ingeniør- og miljøgeologi

Hovedprofil: Ingeniørgeologi og bergmekanikk

Tidsrom: 15.1.2020-10.06.2020

Bjørn Nilsen, Professor/hovedveileder

All the world is a laboratory to the
inquiring mind

Martin.H.Fischer

Sammendrag

Det er utført testforsøk av hydraulisk splitting og jekking på bergartsprøver i laboratorie ved NTNU (Norge teknisk naturvitenskapelige universitet). Testforsøkene har hensikt å sammenlikne metoder for måling av minste hovedspenning for en forenklet ikke-standardisert jekketest. Oppgaven tar sikte på å tilføre grunnlag for effektivisering av spenningsmålinger relatert til design av vannkraftverk, og er tilknyttet forskningssenteret HydroCen.

Kapittel 2 tar for seg relevante bergmekaniske prinsipper. I kapittel 3 presenteres de ulike målemetodene for hydraulisk splitting og jekking benyttet i forsøkene. Her vil også det teoretiske grunnlaget for tolkning av spenninger under sprekkelukking bli beskrevet. Kapittel 4 gir en innføring i teori og bruk av akustisk emisjon i kartlegging av mikroseismisk sprekkeaktivitet. Kapittel 5 går igjennom oppsettet for laboratorieforsøk og beskriver de ulike utstyrskomponentene. Testresultatene er presentert i kapittel 6.

Fire bergartsprøver i størrelse 30x30x30 cm ble brukt i laboratorieforsøkene for forsøk av hydraulisk splitting og jekking. Bergartsprøvene er av type homogen Iddefjordsgranitt. Sprekkekarakteren av splittede sprekker er kartlagt med bruk av akustisk emisjon (AE), som måler mikroseismisk aktivitet av brudd under sprekkeaktivitet. Sammenlikning av 2D og 3D AE kildeplott mot bilder av prøvestykkene viser at AE hendelser stammer fra sprekkeaktivitet. Kartlegging av sprekkekarakter viser at hydraulisk splitting forekommer hovedsaklig normalt på minste hovedspenning, med noen unntak.

Tolkning av sprekkelukking under jekking av sprekke er gjennomført med tre ulike testmetoder; tradisjonell shut-in prosedyre, flowback metoden og stegvis jekketest. To tester fra hver metode er presentert. Alle tre metodene er blitt benyttet til å estimere shut-in trykket (P_s). Estimerte P_s har så blitt sammenliknet med beregnede normalspenninger for sprekkeene. Resultatene viser ingen sammenheng med vanlig shut-in prosedyre, som antas ugyldig på grunn av vannlekkasje ut av prøvestykkene. Trykkanalyse av flowback metoden viser et mindre avvik på under 0.9 MPa, men det er likevel store forskjeller i resultatet fra eksisterende forskning som tyder på effekt av vannlekkasje. Stegvis jekking har best resultat for estimert P_s , med avvik på 0.1 MPa ved bruk av bilinear tolkning. Metoden viser tydelig åpning og lukking av sprekke i måling av relativt vanntrykk.

Aktivitet av akustisk emisjon er blitt sammenliknet med trykk over tid for å påvise mikroseismisk aktivitet under lukking av sprekke. Resultatene viser at det er kun flowback-metoden som gir en god respons på sprekkelukking fra AE målinger. Injeksjonstrykket ved AE respons er likevel mye lavere enn hva som er forventet for lukking av sprekke. Skjærbrudd i etterkant av sprekkelukking er forklart som årsaken, men dette er ikke blitt validert. AE aktivitet registrert under vanlig shut-in prosedyre og stegvis jekking er svak og tolket som støy. Endring fra treffbasert til hendelsesbasert parametrisering av AE er foreslått framover for å skille støy fra reell mikroseismisk aktivitet.

Abstract

Test experiments have been conducted using hydraulic fracturing and jacking of rock samples in the laboratory at NTNU (Norwegian university of science and technology). The purpose of the experiments is to compare methods for measuring the minimum principal stress for a simplified non-standard jacking test. The thesis aims to add a basis for streamlining stress measurements related to the design of hydropower plants, and is affiliated with the HydroCen research center.

Chapter 2 deals with relevant principles of rock mechanics for the thesis. Chapter 3 presents the different methods for measuring hydraulic fracturing and jacking applied in the laboratory experiments. Here, the theoretical basis for the interpretation of stress measurement during fracture closure will be described. Chapter 4 provides an introduction to the theory and application of acoustic emission in the mapping of microseismic activity from fractures. Chapter 5 goes through the practical setup for laboratory experiments and describes the various components of equipment. The test results and interpretations are presented in Chapter 6.

Four 30x30x30 cm rock samples were used in the hydraulic fracturing and jacking experiments. The rock samples are classified as homogeneous Iddefjord granite. The nature of the induced fractures are mapped using acoustic emission (AE), which measures microseismic activity in the rock samples. Comparison of 2D and 3D AE source plots against images of the specimens clearly shows that AE sources are derived from fracture activity. Observations of the fractures shows that hydraulic fracturing occurs mainly normally on the minimum principal stress component, although with minor deviations.

Interpretation of fracture closure have been performed with three different test methods; the traditional shut-in method, the flowback method and the stepwise jacking method. Two tests from each method are presented in the results. All three methods have been used to estimate the shut-in pressure (P_s). Estimated P_s have been compared to the calculated normal stress component of the fractures. The results show no correlation for the traditional shut-in method, interpreted to be invalid due to water leakage out of the sample. Pressure analysis of the flowback method shows lesser deviation in shut-in pressure compared to normal stress from 0 to 0.9 MPa. The results does not correlate with previous research, which indicates a large effect of water leakage when using this method. Stepwise jacking proves to be the best method for estimated P_s , with deviations of only 0.1 MPa using bilinear interpretation. The method shows a clear opening and closing of cracks in the measurement of relative water loss.

Activity in acoustic emission has been compared to the pressure over time to detect microseismic activity during fracture closure. The results shows that only the flowback method gives a good enough response under closure of the fracture in the form of acoustic emission. However, the injection pressure where acoustic emission occurs is much lower than

what is expected for fracture closure. Shear fractures occurring after complete closure are therefore explained as the source for this AE activity, but this hypothesis has not been validated. AE activity recorded during shut-in and step-wise jacking is weak and interpreted as noise. A change from hit-based to event-based parameterization of AE is proposed to distinguish noise from real microseismic activity in future research.

Forord

Masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for geovitenskap og petroleum, NTNU. Oppgaven er knyttet til forskningssenteret HydroCen. HydroCen sitt mål er å bidra med forskning som fører til at norsk vannkraft kan møte komplekse utfordringer og muligheter i fremtidens fornybare energisystem.

Jeg vil først og fremst rette en veldig stor takk til Phd stipendiat Henki Ødegaard, min medveileder og lab-partner. Innsikten hans i laboratoriearbeidet, både praktisk og teoretisk, har vært essensiell for mitt arbeid. Jeg vil og takke hans gode musikkspilleliste og selskap gjennom disse månedene i laboratoriet. Håper vi møtes igjen i nær jobbfremtid!

Jeg vil takke professor Bjørn Nilsen for utmerket oppfølging av oppgaven og gode skrive-tekniske tips. En personlig takk rettes og for hans undervisningsbidrag gjennom alle disse årene. Tusen takk for innsatsen!

For laboratoriearbeidet kreves en god kjennskap til HMS reglene for adgang til laboratoriet. Jeg vil derfor takke Gunnar Vistnes for god HMS opplæring, og for ellers godt selskap disse månedene.

En takk rettes og mot Torkjell Breivik for hjelp med tilgang til laboratoriets leiesystem. Torkjell Breivik har sammen med Steffen Værnes Moen også hjulpet til med loggførings-systemet for laboratorietesting. Tusen takk for hjelpen!

Selv om bruk av numerisk modellering til slutt ikke førte fram, vil jeg likevel takke Nghia Trinh ved SINTEF for lån av sertifiseringsnøkkel til det numeriske programmet UDEC. En takk til Phd stipendiat Bibek Neupane er og fortjent for hjelp med nedlasting av programmet. Dessverre gjorde den pågående COVID-19 pandemien det vanskelig å utføre numeriske simuleringer fra hjemmekontor. Fokuset for oppgaven ble dermed byttet over fra numerisk modellering til ren analyse av laboratorie-data underveis i arbeidet. Pandemien har ellers ikke påvirket arbeidet i særlig stor grad. For det vil jeg takke familien min i Bergen for, som har skapt et godt landskap for hjemmekontoret mitt.

Jeg vil avslutningsvis takke mine medstudenter på sal 310 for samholdet både før og etter koronaen kom til landet vårt. Avbrekkene våres med bordtennis i lesepausene vil bli savnet!

Innhold

Sammendrag	v
Abstract	vi
Forord	viii
Innholdsfortegnelse	xii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Målsetting	4
1.3 Begrensninger	5
2 Bergmekanikk	6
2.1 Spenningsanalyse	6
2.2 Bergmassens materielle egenskaper	8
2.3 Spenningskomponenter på et sprekkeplan	8
2.4 Spenninger rundt en sirkulær borvegg	10
3 Hydraulisk splitting og jekking	12
3.1 Standard metode for hydraulisk splitting og jekking	12
3.2 Forenklet jekketest	16
3.3 Spenningsberegninger av hydraulisk splitting og jekking	16
3.3.1 Minste in situ hovedspenning	16
3.3.2 Strekkstyrke	17
3.3.3 Største in situ hovedspenning	18
3.4 Standard Måling av innsluttingstrykk (shut in)	19
3.4.1 Deteksjon av shut-in trykk fra trykkurve-analyse	21
3.5 Mål av P_s ved stegvis trykkjekking	22
3.5.1 Stegvis Lugeon testing	23
3.5.2 Vanntap ved dilatasjon	24
3.5.3 Tolkning av shut-in trykket	24
3.5.4 Fordeler og ulemper med stegvis trykktest	26
3.6 Flowback metoden	27
3.6.1 System stivhet modellen	28
3.6.2 Direkte måling av system stivhet	29
3.6.3 Tolkning av system stivhet uten volummåling	29
3.6.4 Grafisk tolkning av trykkdata under flowback	32
3.7 Uønskede effekter under testing	34
3.7.1 Ugunstig sprekkegeometri	34
3.7.2 Vannlekkasje under testing	35

3.7.3	Pinch-off effekt	36
4	Akustisk Emisjon	37
4.1	Akustisk emisjons teori	37
4.1.1	Akustisk emisjon i seismologisk sammenheng	38
4.1.2	Endring i bølgeform fra kilde	41
4.2	Måling av akustisk emisjon	42
4.2.1	Forforsterker	42
4.2.2	Signalbehandling	43
4.2.3	Treff basert parameterisering	44
4.3	Lokalisering av hyposenteret	45
4.3.1	Teoretisk grunnlag	45
4.3.2	Event parameteren	49
4.3.3	Optimalisering av AE events	49
4.4	Bruk av akustisk emisjon til hydraulisk splitting	51
4.4.1	Bruk av AE aktivitet i spenningstolkning	51
4.4.2	Detektering av sprekkeplan	52
5	Laboratorie	55
5.1	Oppsett av hydraulisk splitte/jekkeforsøk	55
5.1.1	Spenningsstempler	56
5.1.2	Steinprøver	57
5.1.3	Pakkerstav	57
5.1.4	Injeksjonslinje og Injeksjonspumpe	59
5.2	Oppsett for akustiske emisjonsmålinger	60
5.2.1	Sensorer i testtrigg	60
5.2.2	Representasjon av AE data i AEWIN	61
5.2.3	Signalbehandling	61
5.3	Testprosedyre	64
5.3.1	Montering av prøve og sensorer	64
5.3.2	Klargjøring til testgjennomføring	64
5.3.3	Flømming av prøve	66
6	Laboratorieresultat	68
6.1	Tolkning av hydraulisk splittede sprekker	68
6.1.1	Sprekketolkning ID.001	69
6.1.2	Sprekketolkning ID.002	71
6.1.3	Sprekketolkning ID.003	72
6.1.4	Sprekketolkning ID.004	78
6.2	Vurdering av shut-in tester	80
6.2.1	Shut in test 1	80
6.2.2	Shut-in test 2	84
6.3	Vurdering av flowback tester	88
6.3.1	Flowback test 1	88
6.3.2	Flowback test 2	92
6.4	Vurdering av stegvis jekketester	96

6.4.1	Stegvis jekketest 1	97
6.4.2	Stegvis jekketest 2	100
7	Diskusjon	104
7.1	Avvik i shut-in testing	104
7.2	Erfaringer med flowback metode	105
7.3	Erfaringer med stegvis jekketesting	106
7.4	Bruk av AE events	107
7.5	Normalspenninger og sprekkekarakter	107
8	Konklusjon	109
8.1	Videre arbeid	110
	Referanser	110
	Vedlegg	115
A	Kategorier for Lugeon verdier under testgjennomføring (Houlsby 1976)	115
B	Produktblad Stempelpumpe	117
C	Tabell av lyd hastighetsmålinger (etter Henki Ø)	120
D	2D spredningsplott av akustisk emisjon uten data	123
D.1	Utsikt fra vest (looking east)	124
D.2	Utsikt fra øst (looking west)	125
D.3	Utsikt fra sør (north view)	126
D.4	Fugleperspektiv (top view)	127
E	3D spredningsplott av akustisk emisjon uten data	128
F	Labutstyr	130
F.1	Håndpumper hovedspenninger (etter Henki Ø)	131
F.2	Pakkerstav (etter Henki Ø)	132
F.3	Pakkerstav tilkoblet med injeksjonslinje (etter Henki Ø)	133
F.4	Destillert vann til stempelpumpe (etter Henki Ø)	134
F.5	Stempelpumpe med ventil og strupning (etter Henki Ø)	135
F.6	Datamaskin akustisk emisjon (etter Henki Ø)	136
F.7	Blå sensorplate framside (etter Henki Ø)	137
F.8	Blå sensorplate bakside (etter Henki Ø)	138
F.9	Akustisk emisjonssensor med gummikledning (etter Henki Ø)	139
F.10	Sensorplate med plassert AE sensor (etter Henki Ø)	140
F.11	Forforsterkere (etter Henki Ø)	141
G	Labresultat sprekkegeometri	142
G.1	Oversikt over presenterte testforsøk	143
G.2	2D figurer sprekkenummer 201	146

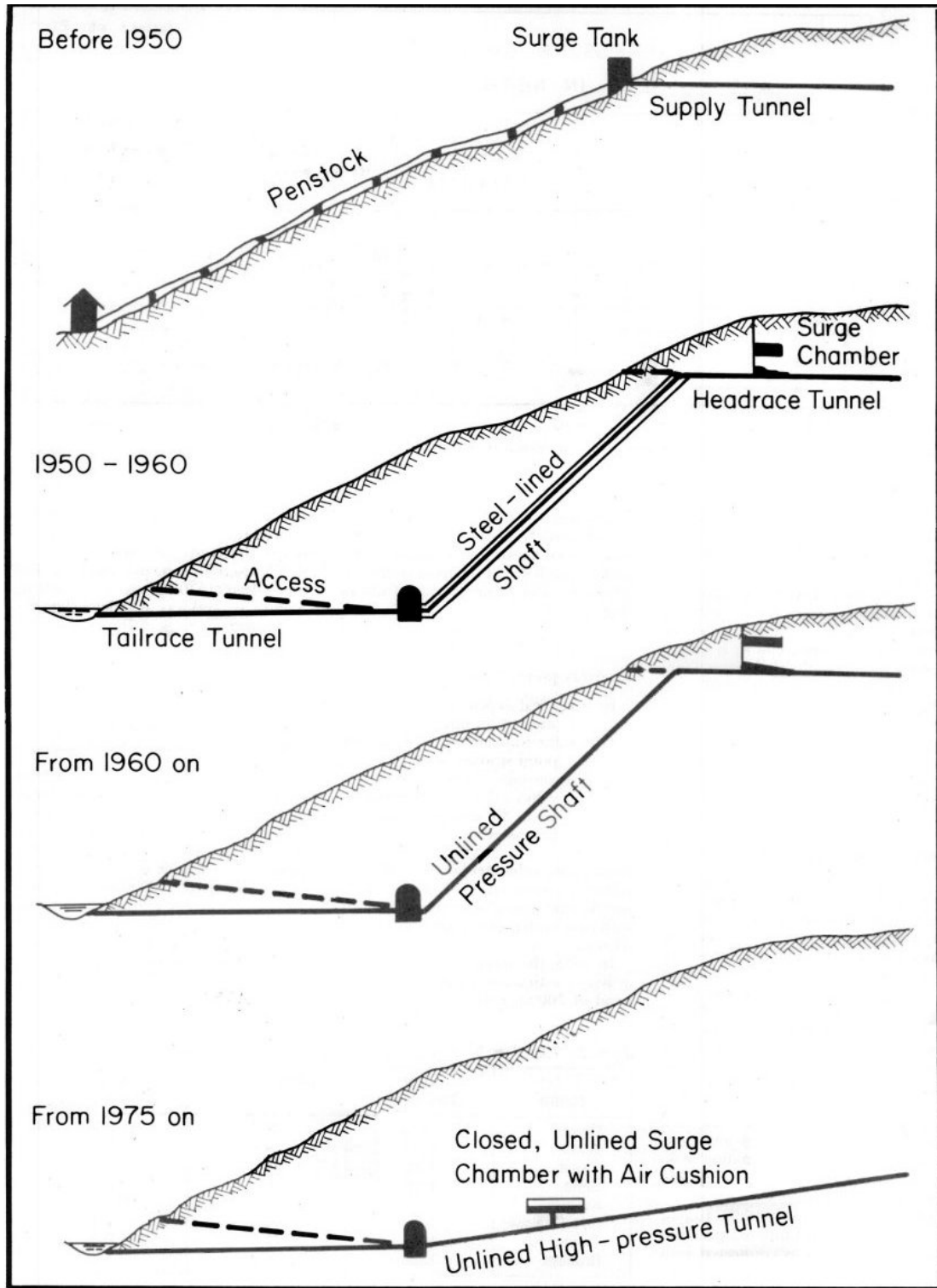
G.2.1	Fugleperspektiv	146
G.2.2	Utsikt fra sør	147
G.2.3	Utsikt fra øst	148
G.3	2D figurer sprekkenummer 301	149
G.3.1	Fugleperspektiv	149
G.3.2	Utsikt fra nord	150
G.4	2D figurer Sprekkenummer 302 og 303	151
G.4.1	Fugleperspektiv	151
G.4.2	Utsikt fra sør	152
G.4.3	Utsikt fra øst	153
G.4.4	Utsikt fra vest	154
G.5	2D figurer Sprekkenummer 401	155
G.5.1	Fugleperspektiv	155
G.5.2	Sett fra sør	157
H	Resultater shut-in tester	159
H.1	Shut-in test 1	159
H.1.1	Andre jekking	159
H.1.2	Tredje jekking	160
H.2	Shut-in test 2	161
H.2.1	Første jekking	161
H.2.2	Andre jekking	162
I	Flowback tester	164
I.1	Flowback test 1	164
I.1.1	Andre jekking	164
I.1.2	Tredje jekking	166
I.2	Flowback test 2	169
I.2.1	Andre jekking	169
I.2.2	Tredje jekking	171

Introduksjon

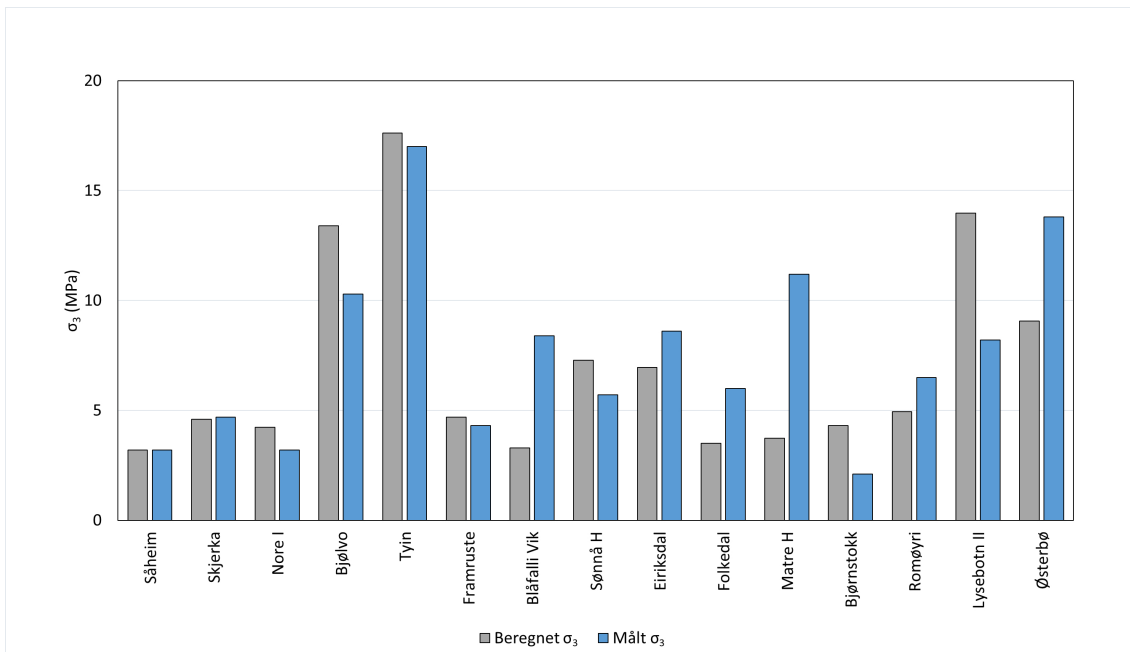
1.1 Bakgrunn

I vannkraftsindustrien overføres vann fra et magasin til et annet for å utnytte den potensielle energien av vannets høydeforskjell. Overføringen skjer via tunneler som transporterer vannet mellom magasinene og fører vannet gjennom en turbin for overføring til elektrisk energi. Hovedoppgaven i designet av disse tunnelene er å kunne transportere vannet gjennom hele prosjektets levetid uten å skape ødeleggende virkning på tunnelets nærområde (Benson 1989).

Gjennom den historiske utviklingen av vannkraftverk i Norge har det blitt utført store endringer i designet av transporttunneler, godt beskrevet i Broch (1984). Før 1950 - tallet ble det i stor grad benyttet kraftstasjoner og rørgater i dagen. Vanntrykktunneler som eksisterte var i den tid overføringstunneler med lavt trykk. Fra 50 - tallet av ble vannkraftanleggene flyttet inn i berget av sikkerhetsmessige hensyn. Det ble her først brukt tunneler med stålrør slik det hadde blitt gjort i dagen, som krever store stålrressurser med høye kostnader. En ny løsning i form av uforede trykktunneler fikk innpass i Norge i 1958, etter den vellykkede installasjonen av kraftverket Tafjord K3. Med uforede trykktunneler begrenses bruken av stålforing som reduserer de endelige kostnadene for et vannkraftverk. Utviklingen i design av vannkraftverk i Norge er vist i **fig. 1.1**



Figur 1.1: Utviklingen av den generelle layouten for vannkraftverk i Norge under etterkrigstiden. Moderne desgin av vannkraftverk benytter seg av uforede trykk tunneler som vist i nederste figur. Fra ?.



Figur 1.2: Oversikt over beregnede minste hovedspenning mot målte verdier for 15 vannkraftprosjekter i Norge (Ødegaard, Barkved og Nilsen 2019).

Et sentralt prinsipp i design av uforede trykktunneler er at vanntrykket i tunnelen ikke skal overstige de bergmekaniske spenningene, nærmere sagt minste in situ hovedspenning. Avvik fra dette prinsippet kan føre til hydraulisk jekking av fjellet i tunnelveggen og store vannlekkasjer. I verste tilfelle kan en uavbrutt vannlekkasje føre til oversvømmelser i underjordiske anlegg og jordskred i dagen, rapportert blant annet av Brekke og Ripley (1987), Benson (1989), og Palmstrøm og Buen (2017)

For å støtte opp mot prinsippet har ulike "tommelfingerregler" blitt utarbeidet for å kunne estimere spenningene basert på mektigheten av overliggende berg. Disse reglene har vært nyttige og rimelige i tidligere tider da direkte metoder for målinger av bergspenning ikke var tilgjengelig i Norge. I nyere tid er det likevel blitt vist at idealiserte forenklinger ikke er tilstrekkelig for å bestemme designet i en uforet trykktunnel. Fra flere hold er det konkludert med at "tommelfingerregler" ikke må brukes som kriterie for endelig design, se (Benson 1989), (Merritt 1999), og (Rancourt og Mitri 2011). Ødegaard, Barkved og Nilsen (2019) har i tillegg vist at det eksisterer store avvik mellom beregnede minste hovedspenning basert på tommelfingerregler og målte verdier, vist i **fig. 1.2**.

Direkte målinger av bergspenninger blir derfor sett på som nødvendig for bestemmelse av design av en uforet trykktunnel. Hydrauliske metoder i form av splitting og jekking av eksisterende sprekker har pekt seg ut som den beste standardiserte målemetoden for minste in situ hovedspenning (Haimson og Cornet 2003). Andre målemetoder som overboring har vist seg å ikke estimere minste hovedspenning like godt, selv om de gir et godt mål på hovedspenningenes retninger (Hanssen 1997). Nåværende ISRM standard for hydraulisk splitting og jekking innebærer likevel både ressurs- og tidkrevende målinger. Det er derfor

av stor interesse å forenkle testmetoden for å øke antall målinger med mindre kostnader.

I Norge eksisterer det forenklede hydrauliske jekketester for å kunne bestemme konusplassing i en trykktunnel (Ødegaard og Nilsen 2018). Disse metodene er ikke standardisert eller godkjent som generell testmetode, men inneholder store likheter med tester for jekking av eksisterende sprekker nevnt i ISRM standarden, som stegvis hydraulisk jekking (Rutqvist og Stephansson 1996). Fordelen med å bruke forenklede jekketester er at testutstyret som kreves allerede brukes i utgraving på stoff av tunnel, i form av berginjeksjonsutstyr. Ved å benytte seg av eksisterende utstyr på anlegg kan anleggsarbeidere enklere benytte seg av testmetoden og unngå unødvendig opplæring. Det er estimert at en slik simplifisert test vil kunne redusere kostnadene for spenningsmålinger i trykktunnelen med 10 til 20 % (Ødegaard og Nilsen 2018).

Det er beskrevet i gjeldende ISRM standard (Haimson og Cornet 2003) at målinger av minste hovedspenning må kombineres med flere metoder for hydraulisk splitting og jekking på grunn av stor usikkerhet rundt målingene. Forutenom metodene beskrevet i standarden er andre metodikker blitt utviklet i petroleumsindustrien, som i senere tid har erstattet tradisjonelle metoder i dette fagfeltet (Raaen et al. 2001). Videre har ny teknologi i form av akustisk emisjon vist seg å kunne detektere mikroseismisk aktivitet relatert hydraulisk splitting og jekking av sprekk i både tid og rom (Ishida 2001), (Stanchits et al. 2014). Disse nye teknologiske metodene kan være med på å forbedre eksisterende standard for hydrauliske metoder.

1.2 Målsetting

Masteroppgaven skal kunne gi et bedre faglig grunnlag for standardisering av forenklede hydrauliske testmetoder og skape tilskudd til gjeldende ISRM standard. Laboratorieforsøk skal analyseres for å kunne direkte sammenlikne testrespons med initielle betingelser i dimensjonerte steinprøver. Målsettingene for oppgaven er som følger:

- Kartlegge hydraulisk jekkede sprekker med bruk av akustisk emisjon for informasjon om sprekkekarakter og normalspenning i sprekk. Sammenlikning av bilder fra laboratorieprøvene og romlige plott av akustisk emisjon vil bli brukt for å bekrefte om akustisk emisjon kan brukes til sprekketolkning.
- Påvise en sammenheng mellom estimerte shut-in trykk P_s for ulike hydrauliske testmetoder og beregnede normalspenninger for jekkede sprekkesystem. Dette kan så brukes til å sammenlikne testmetodene med hverandre og påvise styrker og svakheter ved de ulike metodene.
- Akustisk emisjon vil bli brukt til å undersøke mikroseismisk aktivitet under lukking av jekket sprekk. Målet er å bekrefte eller avkrefte om mikroseismisk aktivitet kan brukes som ekstra informasjon under lukkefasen for tolkning av sprekkenes normalspenning.

1.3 Begrensninger

Arbeidet utført i denne masteroppgaven er kun relatert til laboratoriearbeid og representerer ikke reelle feltmålinger. Resultatene som er presentert i denne oppgaven har derfor særegne trekk fra begrensninger med opphav i laboratorieoppsett. Dette gjelder spesielt skalaen for testforsøkene, som er mye mindre i arbeidet presentert her enn hva som er realiteten i felt. Avvik fra liknende målinger utført i felt må derfor forventes og usikkerhetene som herfra oppstår adresseres.

Kapittel 2

Bergmekanikk

En teoretisk forståelse av bergets mekaniske egenskaper er nødvendig for å kunne skape et grunnlag for bergmekanisk testing. Bergmekanikk som vitenskap omhandler bergets respons på kraftfeltet av de fysiske omgivelsene (Judd 1964). I dette kapittelet vil sentrale bergmekaniske begrep og teorier bli presentert som er relevante videre i oppgaven.

2.1 Spenningsanalyse

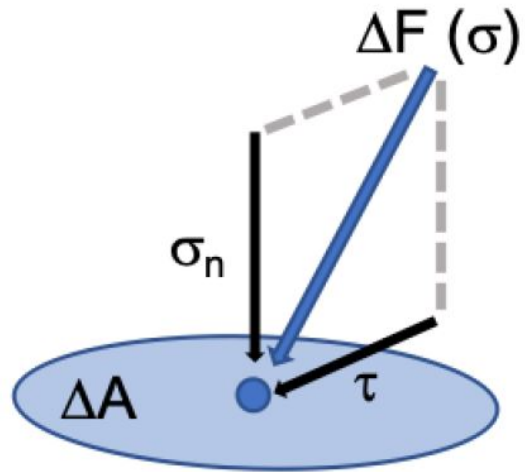
Spenning σ er definert som kraftintensiteten og kan defineres følgende.

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

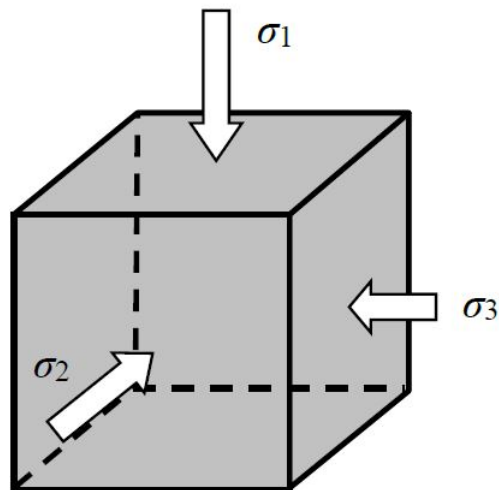
Der den gjennomsnittlige kraften ΔF virker inn på et areal ΔA , som tilnærmes 0 om spenningen defineres i et punkt.

Spenningen i formel 2.1 er en vektorfunksjon som beskrives med en magnitudo og en retning. Spenningen kan deles inn i to komponenter, normalspenningen σ_n , som virker normalt på planet, og skjærspenningen τ som virker langs planet (se fig. 2.1). Spenningsretningen vil i et bergmekanisk perspektiv alltid peke innover i et punkt.

I virkeligheten er bergmasser utsatt for spenning i enhver retning. I stedet for betrakte bergmassen som et areal, vil et volumetrisk punkt med tre ortogonale sider i rommet kunne beskrive spenningens tredimensjonale virkelighet. I ethvert punkt i bergmassen vil det eksistere tre ortogonale flater med null skjærspenning. De tre normalspenningene som utgjør dette punktet kalles for hovedspenninger, som er orientert ortogonalt på hverandre. Etter styrke betegnes hovedspenningene σ_1 for største, σ_2 for mellomste og σ_3 for minste. Dermed er bergmassens spenninger beskrevet i både styrke og retning. Figur 2.2 beskriver hovedspenningene et punkt.



Figur 2.1: Konseptuell framstilling av spenning i et gitt punkt. Det infinitesimale arealet ΔA påføres en kraft ΔF fra en gitt retning. Spenningsvektoren σ kan deles inn i en normalspenning σ_n og en skjærspenning τ . Basert på Li (2018)



Figur 2.2: Tre hovedspenninger med respektive orienteringer i et punkt. Fra Li (2018).

Spennings situasjonen i enhver bergmasse kan være påvirket av både regionale spenningsregimer og lokale forhold (Li 2018). Under laboratoriske forhold kan spenningsregimet bli styrt av brukeren.

2.2 Bergmassens materielle egenskaper

En bergmasse er definert av to komponenter. Den ene komponenten er bergartens intakte egenskaper. Den andre komponenten er diskontinuiteter i bergmassene. Diskontinuiteter i bergmassen beskriver mekaniske områder med tilnærmet null strekkstyrke. Eksempler på dette er sprekker, skifrige soner i bergarten og forkastninger. Som en hovedregel dominerer diskontinuiteter i bergmassen mer jo større skala bergmassen er i. (Nilsen og Palmström 2000).

De materielle egenskapene i bergmassen deles derfor inn i egenskaper relatert til bergarten og egenskaper relatert til diskontinuiteter. Sprekker i bergmassen er en type diskontinuitet. I tillegg kan anisotropi i bergartens krystallstruktur påvirke både spenningsregimet sprekkekarakteren i bergmassen.

2.3 Spenningskomponenter på et sprekkeplan

Som nevnt i delkapittel 2.1, kan hovedspenningen deles inn i normalspenning og skjærspenning. Inndelingen er svært viktig i betraktningen av sprekkesett i bergmassen. Sprekker i bergmassen opptrer som plan. I et plan er det normalspenning og skjærspenning som bestemmer bevegelser og brudd som oppstår i sprekkeplanet. Dette delkapittelet tar for seg de viktigste hovedtrekkene i beregning av normalspenningen for et tilfeldig sprekkeplan, og tar utgangspunkt i Li (2018), side 14-16, med mindre annet er gitt.

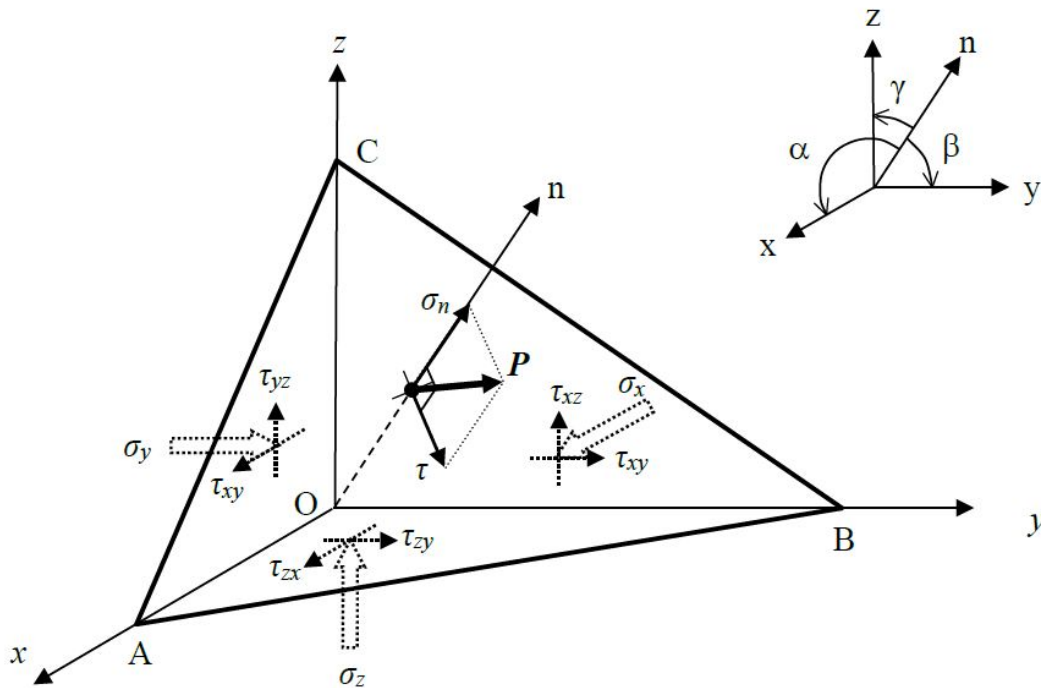
Gitt et kubisk bergartselement med hovedspenninger som vist i **fig. 2.2** kan normalspenningen og skjærspenningen på et arbitrært plan i element direkte defineres. Hvis skjærspenninger i det kubiske elementet er neglisjerbare, utgjør hovedspenningene komponentene i den fullstendige *spenningsmatrisen*, definert i likning 2.2.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

For å forenkle videre utregninger kan aksene for hovedspenningene antas å følge et 3 dimensjonalt kartesisk koordinatsystem. Dermed kan hovedspenningene defineres som normalspenningene for hver kartesisk akse i likning (2.3)

$$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) \quad (2.3)$$

For å konvertere hovedspenningene over til normal og skjærspenning for et tilfeldig plan i kuben, må normalvektoren for planet defineres. Normalvektoren betegnes som en *enhetsvektor*, og kan utregnes fra fallretningen og fallvinkel til planet. Gitt vinkelkomponentene



Figur 2.3: Oversikt over spenningskomponenter på et tetraeder i x,y,z koordinater. Figuren i øverste høyre hjørne viser vinklene som definerer normalvektoren for planet ABC. Fra Li (2018).

vist i øverste høyre hjørne i **fig. 2.3**, er enhetsvektoren for normalen til planet \mathbf{n} definert med vinkelen fra hver kartesisk akse (se likning 2.4).

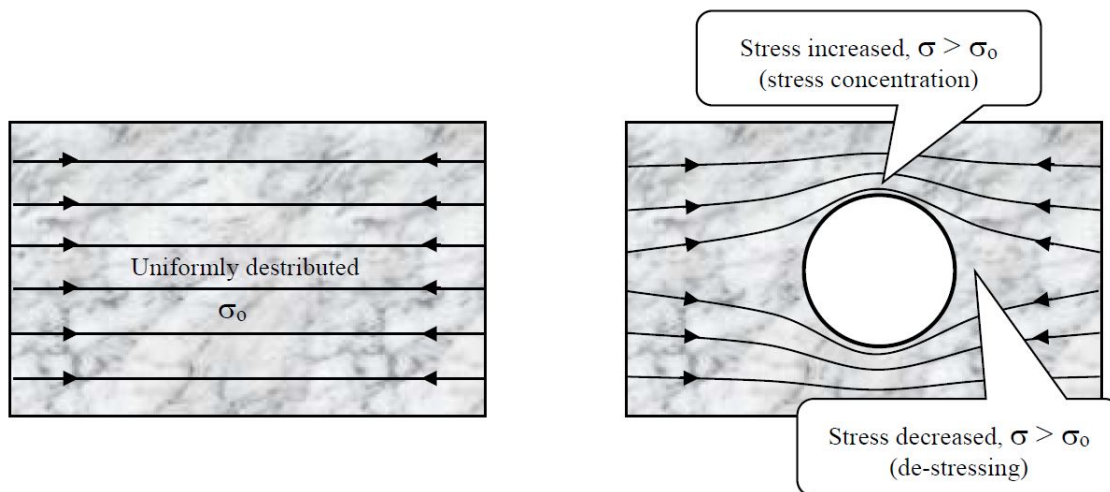
$$\mathbf{n} = (l, m, n) = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma) \quad (2.4)$$

Der α , β og γ er vinklene fra henholdsvis x-, y- og z-aksen på normalvektorens retningslinje.

Fig. 2.3 viser et tetraeder avkortet fra en kube med planet ABC. Den totale spenningen på ABC omtales her som \mathbf{P} , med hovedkomponenter i form av normalspenning σ_n og skjærspenning τ . Både \mathbf{P} , σ_n og τ er vektorer med komponenter i x-, y- og z-retning. Fra utregningene beskrevet av Li (2018), side 15, kan normalspenningen til planet ABC beregnes. Utregningen baseres på normalvektoren til planet \mathbf{n} og de kartesiske aksenes normalspenninger, definert i likning 2.5.

$$\sigma_n = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} = l^2 \sigma_x + m^2 \sigma_y + n^2 \sigma_z \quad (2.5)$$

Der l, m og n er de kartesiske komponentene fra planets normalvektor definert fra likning 2.4. Likning 2.5 brukes dermed til å beregne normalspenningen på et sprekkeplan gitt hovedspenningene, koordinatsystemet for x,y,z, og normalvektoren som definerer planets geometri. I tilfeller med skjærstyrke på x-, y- og z-planet vil likning 2.5 utvides med bruk av skjærkomponenter og. I denne oppgaven er likningen benyttet til å beregne normalspenningen for hydraulisk induserte sprekker som opptrer under testforsøk.



Figur 2.4: Spenningsfordeling i en bergmasse før (a) og etter (b) en sirkulær utgraving. Fra Li (2018).

2.4 Spenninger rundt en sirkulær borvegg

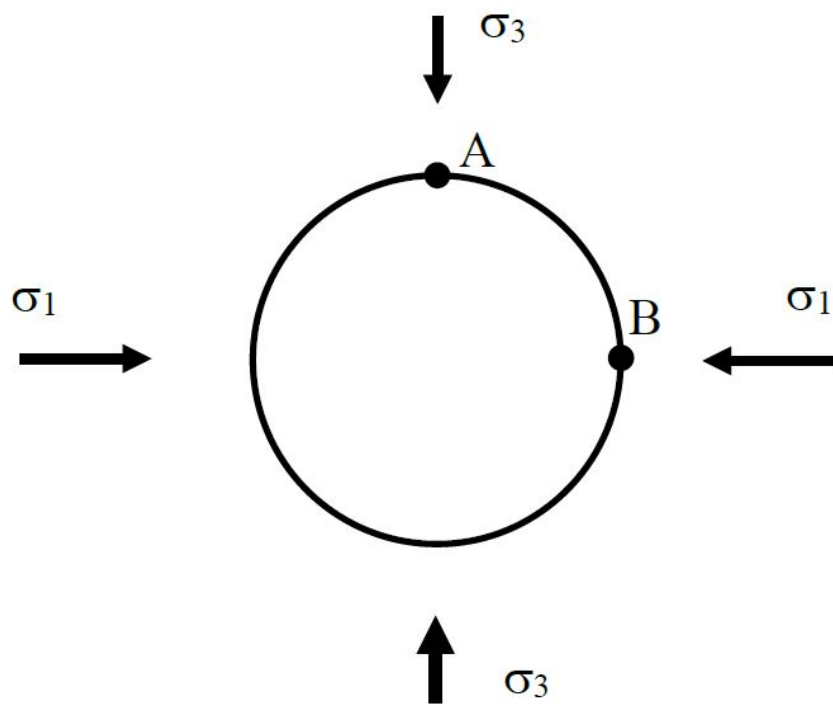
I en upåvirket og isotrop bergmasse vil de bergmekaniske spenningene som påføres bli likt fordelt i materialet. Spenningsfordelingen endrer seg hvis deler av bergmassen utgraves. Dette skjer under utgraving av tunneler, gruver og i denne oppgavens tilfelle, borhull i en bergartsprøve. Omfordelingen av spenninger fører til lokal konsentrasjon og avlasting av spenning rundt borveggen. De lokale spenningsforholdene kalles for *sekunderspenninger* (Li 2018) og er sterkest langs borveggen, men tilnærmes hovedspenningene lenger vekk fra borveggen. **Fig. 2.4** viser hvordan spenningen omfordeles etter utgraving av et sirkulært borhull.

Sekundærspenningen som opptrer parallelt på borveggens overflate betegnes som tangensialspenningen. I et 3 dimensjonal system, hvor største og minste hovedspenning virker normalt på borveggen, kan tangensialspenningenes maksimum og minimum beskrives med kirsch likningene (2.6, 2.7).

$$\sigma_{\theta A} = 3\sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.6)$$

$$\sigma_{\theta B} = 3\sigma_3 - \sigma_1 \quad (2.7)$$

Der $\sigma_{\theta A}$ er den maksimale tangensialspenningen i punkt A og $\sigma_{\theta B}$ er den minimale tangensialspenningen i punkt B. En modell av punkt A og B på borveggen med minste og største hovedspenning er vist i **fig. 2.5**.



Figur 2.5: Hovedspenninger σ_1 og σ_3 påført en borvegg med minimum og maksimal tangensialspenning i henholdsvis punkt A og punkt B. Fra Li (2018).

Hydraulisk splitting og jekking

Hydraulisk splitting og jekking er en standardisert testmetode for å måle spenningsforholdene in situ i bergmassen (Haimson og Cornet 2003). Det grunnleggende prinsippet for hydraulisk splitting er å skape en hydraulisk splittet sprekk i bergmassen og måle trykkresponsen av prosessen. Det utføres ved å isolere en seksjon av et borehull som tilføres injisert vann. Tilstrømningen av vann vil gradvis øke vanntrykket i borhulls-seksjonen til en sprekk induseres. Samme prosedyre kan også brukes til å åpne allerede eksisterende sprekker. Testmetoden blir da kalt for hydraulisk jekking. Hydraulisk jekking utføres vanligvis i etterkant på en sprekk påført av hydraulisk splitting (Haimson og Cornet 2003).

Som beskrevet i introduksjonskapittelet er testmetoden nyttig i evaluering av spenningsforholdene i trykktunneler. Vanntrykket som påføres i testmetoden kan nært sammenliknes vanntrykket som er tilstede i transporttunneler med vann under høyt trykk. Testmetoden er derfor svært presentabel for problemområdet den er ment å løse.

3.1 Standard metode for hydraulisk splitting og jekking

I dette delkapittelet vil den tradisjonelle metoden for hydraulisk splitting beskrevet i henhold til ISRM standarden (Haimson og Cornet 2003). Den stegvise jekketoden er beskrevet i delkapittel 3.5, mens flowback (tilbakestrømnings) metoden vil bli beskrevet nærmere i delkapittel 3.6. Videre vil avvik fra standard i laboratorieforsøket bli beskrevet nærmere i kapittel 5.

Hydraulisk splitting og jekking gjennomgår den samme praksisen i testutføring (Haimson og Cornet 2003). Første del av testutføringen består i å drille et borehull ned i berget. Dette gjennomføres vanligvis vertikalt, med mindre topografiske effekter eller strukturer i berget tilsier noe annet. For bruk til grunnundersøkelser i ingeniørgeologiske prosjekter er diameteren på borhullet anbefalt til å være mellom 76 og 96 mm.

Videre må borhullet kartlegges for å observere om eksisterende sprekker eller andre avvik som svakhetssoner. For hydraulisk splitting er det viktig at testområdet ikke inneholder sprekker men intakt berg. Grunnen til dette er at sprekkeplanene kan påvirke testresultatene og gi grunnlag for feiltolkning. For hydraulisk jekking av eksisterende sprekker er det derimot viktig at sprekkeplanene kartlegges med strøk og fall for å kunne gjengi spenningforholdene i sprekkeplanet (Haimson og Cornet 2003). For denne delen av testutførelsen er analyse av borkjerne og geofysisk logging av borhull viktige verktøy.

Når testintervall i borhullet er valgt ut strammes to gummipakker i borhullet på endene i testseksjonen. Gummipakkene strammes inn mot borveggen på 2-4 MPa ved å pumpe inn vann i pakkene. Dette gjøres for å unngå lekkasje i borhullet under testgjennomføringen, men holdes på et relativt lavt trykknivå for å hindre sprekkeutvikling før testen utføres.

Etter innstramming av borhullet kan testingen begynne. Det er først vanlig med en initiell permeabilitetstest (på engelsk: slug test) for å kunne kvantifisere permeabiliteten i testseksjonens borvegg (Haimson og Cornet 2003). Her fylles testseksjonen med vann og vanntapet som herfra oppstår antas å ha en direkte sammenheng med permeabiliteten i bergmassen, som her tolkes.

Etter at permeabiliteten er vurdert begynner hovedprosessen i testen. Hovedprosessen kan deles inn i 3 deler:

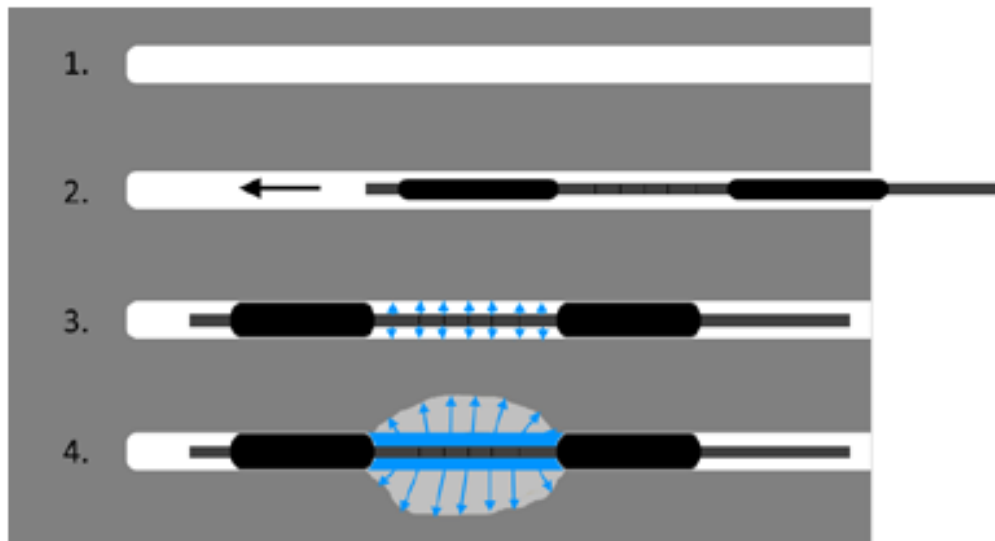
- Trykkoppbygging
- Sprekkeåpning
- Trykksenking

Injeksjonstrykket og innstrømningsraten måles under hele testforsøket. Første delen av testen er å øke vanntrykket i testseksjonen med en konstant innpumping av vann til en sprekke er indusert. Vannet til testseksjonen tilføres gjennom et eget rør separat fra vannet til gummipakkene. **fig. 3.1** viser de første stegene i en hydraulisk splitting av sprekke.

Når trykkoppbyggingen i testseksjonen stopper opp, er dette et tydelig tegn på at en sprekke i borveggen er splittet. Toppen på trykkoppbyggingen blir omtalt som "breakdown pressure" (strekkebrudd-trykket) P_b (Haimson og Cornet 2003). Toppen P_b etterfølges deretter av en brå nedgang i trykk fordi strekkstyrken i borveggen er brutt ned (se **fig.3.2**).

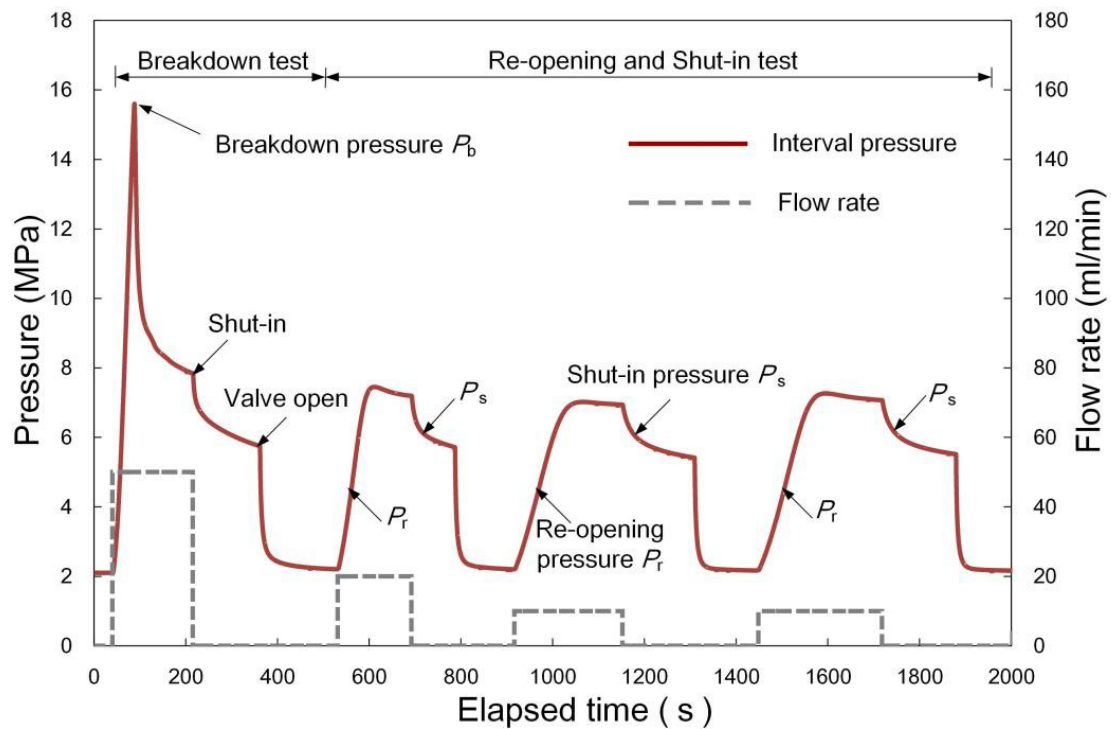
Når det er tydelig at trykktoppen er nådd, stanses etterhvert pumpingen av vann til testseksjonen. Dette skjer mens trykkventilen til overflaten fortsatt er lukket. Dette medfører en gradvis nedsynkende kurve, der den induserte sprekken i borveggen lukkes igjen underveis. Injeksjonstrykket der lukkingen av sprekke begynner defineres som "instantaneous shut in pressure" ($P_{s,i}$) (Haimson og Cornet 2003). Etter noen minutter når trykkkurven har flatet ut tilstrekkelig åpnes trykkventilen og trykket i testseksjonen synker tilbake på nivået før testing.

Denne testprosedyren utføres så på samme måte 3 ganger til for å kunne få nok kunnskap om trykkparameterene. Siden sprekken i de resterende testsyklusene allerede er laget, vil



Figur 3.1: De første stegene i en hydraulisk splittetest. Fra Ødegaard, Barkved og Nilsen (2019).

trykktoppen bli lavere enn ved første syklus. Åpningen av eksisterende sprekk kan tolkes når stigningen i de etterfølgende trykksyklusene svekkes av i forhold til første syklus. Senkning i trykkstigningen impliserer innstrømming av vann i sprekk, som betyr at sprekk begynner å åpne seg. Trykket der gjenåpningen av sprekk begynner defineres som "reopening" trykket P_r . Trykkparameteren P_r er alltid lavere enn breakdown trykket P_b , fordi strekkstyrken i bergmassen er brutt etter at P_b inntreffer.



Figur 3.2: Eksempel på en typisk trykk mot tid diagram av hydraulisk splitting i intakt berg. Første syklus, her navngitt som breakdown test, induserer en sprekk i borveggenes intakte berg. Trykktoppen måles her som breakdown trykket P_b . Syklusen avsluttes først med shut in så med åpning av hydraulikk-linje (valve open). De tre resterende syklusene innebærer jekking av eksisterende sprekk, som tilsammen gir et mål på P_s og P_r . Den konstante strømningsraten før shut in er illustrert med en sekundær grå stiplet y-akse. Fra Yokoyama et al. (2017)

3.2 Forenklet jekketest

Testutføringen av jekketester følger i ISRM standard samme oppsett som splittetester. I Norge eksisterer det likevel forenklete versjoner av nevnte jekketest for å bestemme plassering av konus i vannkraftverk (Ødegaard, Barkved og Nilsen 2019). De forenklete jekkestestene er ikke standardisert og kan derfor utføres med ulike varianter. Hovedtrekkene kan likevel oppsummeres:

- Et antall borhull lages i måleområdet for å kartlegge alle eksisterende sprekkesett
- En enkeltpakke føres inn i et utvalgt borhull og isolerer testseksjonen mellom gummipakke og hulbunn.
- Gummipakken strammes opp og vann injiseres i testseksjonen for trykkoppbygging. Ofte utføres trykkoppbyggingen stegvis.
- Når sprekken åpnes reduseres injeksjonstrykket og strømningsraten øker. Trykket ved sprekkeåpning omtales som jekketrykket. Strømningen av vann reduseres så igjen til lukking inntreffer.
- Samme utførelse av test gjøres i flere hull for å kartlegge jekketrykket til sprekke i området

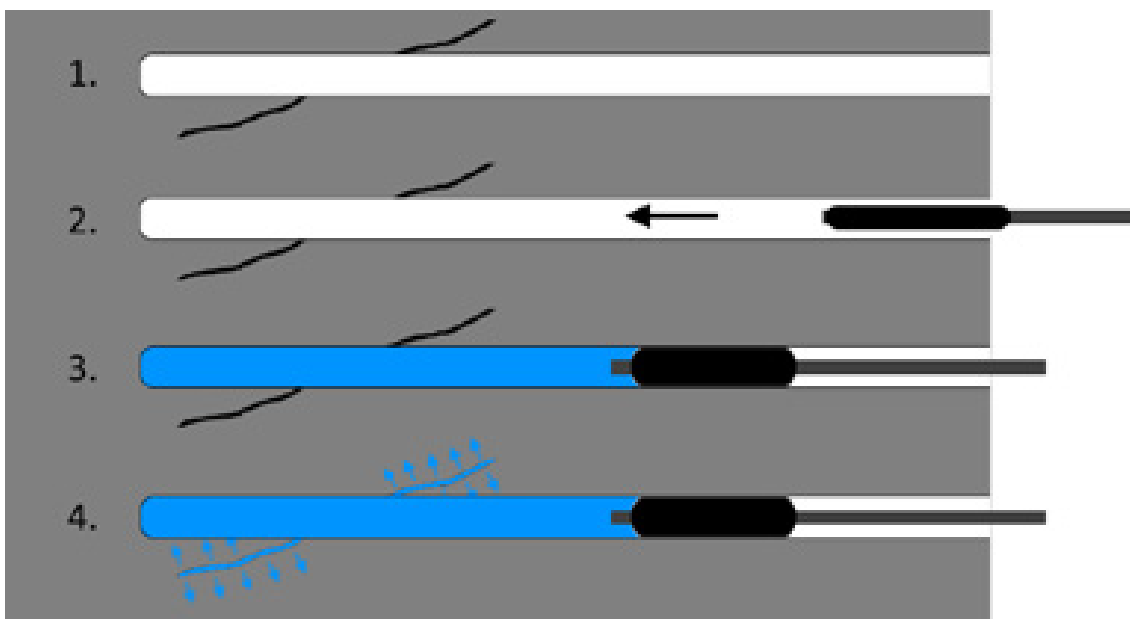
Fig. 3.3 viser en prinsippskisse for den forenklete jekketesten. I praksis er det utført mest med metoden for stegvis jekking. Hovedforskjellen fra vanlig metodeoppsett er erstatningen av to gummipakker med en enkeltpakke. I norsk praksis er metoden mye benyttet fordi den er svært praktisk og enkel (Ødegaard, Barkved og Nilsen 2019). Den forenklete jekketesten utgjør basisen for oppsettet brukt under laboratorieforsøkene i denne oppgaven.

3.3 Spenningsberegninger av hydraulisk splitting og jekking

De målte parameterene P_b , P_r og P_s utgjør grunnlaget for tolkningen av in situ hovedspenningene i bergmassen ved testseksjonen (Haimson og Cornet 2003). Ifølge ISRM standarden er hovedspenningene notert vanligvis etter vertikal og horisontal akse, utifra antagelsen om at den vertikale bergspenningen er en av hovedspenningene. Videre antas borhullet å følge vertikal retning på ± 15 graders vinkel ned i grunnen. Disse to antagelsene er ikke alltid gyldige, og vanlig nummerert hovedspenningsbennevning må benyttes om situasjonen er annerledes. I dette delkapitlet benyttes benevningene brukt i ISRM standarden (Haimson og Cornet 2003), med mindre annet er gitt. Spenningsregime er

3.3.1 Minste in situ hovedspenning

I intakt berg er den generelle antagelsen at en hydraulisk oppsprekking følger minste motstands vei og sprekker opp normalt på minste hovedspenning (se **fig.3.4**). I et spenningsregime der minste hovedspenning inntreffer horisontalt, gir dette en vertikal sprekke



Figur 3.3: Prinsipiell skisse av forenklete jekketester

langs testseksjonens borvegg. Sprekken vil åpne seg når vanntrykket er større enn minste hovedspenning, og være gjenlukket når vanntrykket er mindre. Dette betyr implisitt at vanntrykket i sprekkene er lik minste hovedspenning idet sprekkene begynner å lukke seg etter åpning, også kalt shut-in. Dette gir et direkte mål på minste in situ hovedspenning av shut-in trykket P_s , først beskrevet av Kehle (1964):

$$P_s = \sigma_3 \quad (3.1)$$

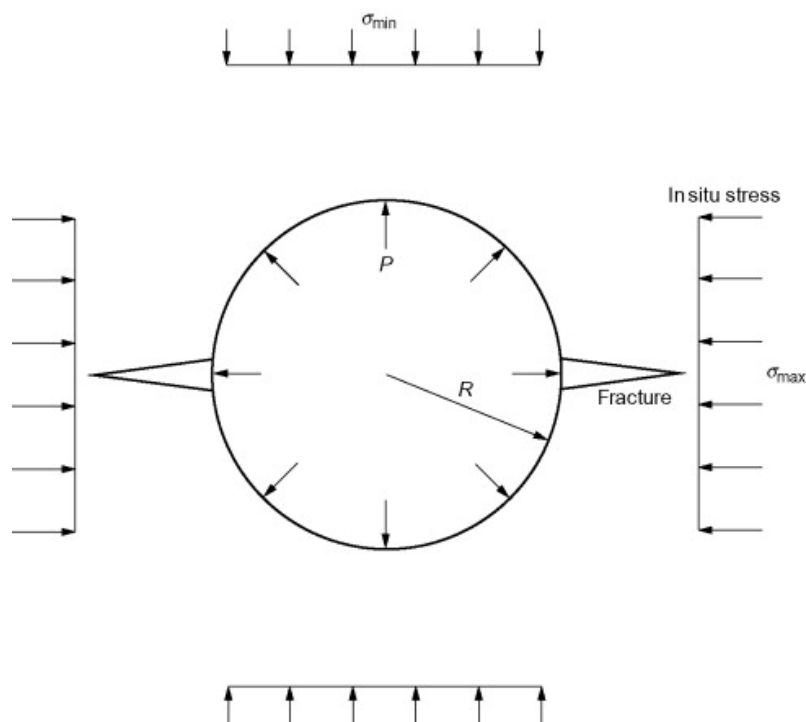
Der σ_3 er minste hovedspenning i *MPa*. I tilfeller med vertikal oppsprekking blir minste hovedspenning ofte benevnt med σ_h , der h er en benevning for den minste horisontale hovedspenningen.

I realiteten er det likevel ikke alltid at den hydrauliske sprekkene opptrer perfekt normalt på minste hovedspenning. I tilfeller hvor sprekkene avviker fra dette må normalspenningen σ_n for sprekkene brukes som et direkte mål på shut-in trykket istedet for σ_3 . I praksis er det vanskelig å vite om normalspenningen til sprekkene avviker fra minste hovedspenning, men i laboratorieforsøk er dette mulig å kartlegge. Likning 3.2 er en mer generell betegnelse for shut-in trykket.

$$P_s = \begin{cases} \sigma_3, & \text{hvis } \sigma_n = \sigma_3 \\ \sigma_n, & \text{ellers} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3.2 Strekkstyrke

Etter en utført testrunde vil syklusene gi et mål på både breakdown trykket P_b og re-opening trykket P_r . Som nevnt i delkapittel 3.1 er forskjellen på P_b og P_r strekkbruddet



Figur 3.4: Simplifisert horisontalt tversnitt av spennings situasjonen i testseksjonen. Borhullet med en Radius R og utøver et vanntrykk P normalt på borveggen. Oppsprekking (fracture) inntreffer normalt på in situ minste hovedspenning, på figuren her definert som σ_{\min} . Fra Yew og Weng (2014).

som sprekken utfører. Strekkbruddet fører til at strekkstyrken i bergmassen forsvinner ved sprekkeåpningen. Differansen mellom P_b før strekkbrudd og P_r etter strekkbrudd er derfor definert som strekkstyrken, beskrevet i likning 3.3.

$$T = P_b - P_r \quad (3.3)$$

Likning 3.3 forutsetter at både P_b og P_r er kjent. I noen tilfeller kan P_r være vanskelig å måle. Dette kan skyldes trykkurver der P_r ikke er riktig identifisert (Lee og Haimson 1989), eller høy pumpemengde av vann i testseksjonen sammenliknet med sprekkeåpningen (Ito et al. 1999). Mål av strekkstyrke er derfor vanligst utført med andre teststandarder som Brasil-testen (Haimson og Cornet 2003).

3.3.3 Største in situ hovedspenning

Siden borhullet i testmetoden er av sylindrisk i form, gjelder sekundærspenningene for et sirkulært tversnitt på lik måte i borhullet som for enhver sirkulær tunnelåpning. Derfor kan kirsch likningene for tangensialspenninger, beskrevet i delkapittel 2.4, benyttes i spenningsmålingene for hydraulisk splitting (Haimson og Cornet 2003).

Strekkbruddet som inntreffer i borveggen under hydraulisk splitting må kunne overgå tangensialspenningen og strekkstyrken for å oppstå. Strekkbruddet skjer der tangensialspenningen er minst, og kan beskrives med følgende likning.

$$P_b = \sigma_{\theta min} + T \quad (3.4)$$

Der $\sigma_{\theta min}$ er minste tangensialspenning. Fra kirsch sin formel for minste tangensialspenning kan dermed likning 3.4 omformes slik.

$$\implies P_b = 3\sigma_h - \sigma_H + T \quad (3.5)$$

Der σ_h og σ_H er henholdsvis minste og største horisontalspenning. Ved å flytte om P_b og σ_H i likning 3.5 skapes et uttrykk for største horisontalspenning σ_H . Samtidig vet vi fra delkapittel 3.3.1 at den minste horisontalspenningen kan måles direkte fra shut-in trykket P_s , med mindre sprekken er ugunstig orientert. Dette gir følgende uttrykk.

$$\implies \sigma_H = 3P_s - P_b + T \quad (3.6)$$

Gjennom måling av shut-in trykket P_s , breakdown trykket P_b og strekkstyrken for intakt berg T kan dermed største horisontale hovedspenning beregnes. I tilfeller der gjenåpnings trykket P_r er sikker i målingen kan denne benyttes framfor P_b og T . Likning 3.6 forenkles da videre.

$$\implies \sigma_H = 3P_s - P_r \quad (3.7)$$

Forenklingen i likning 3.7 er basert på antagelsen om at likning 3.3 er gyldig for testrunnen.

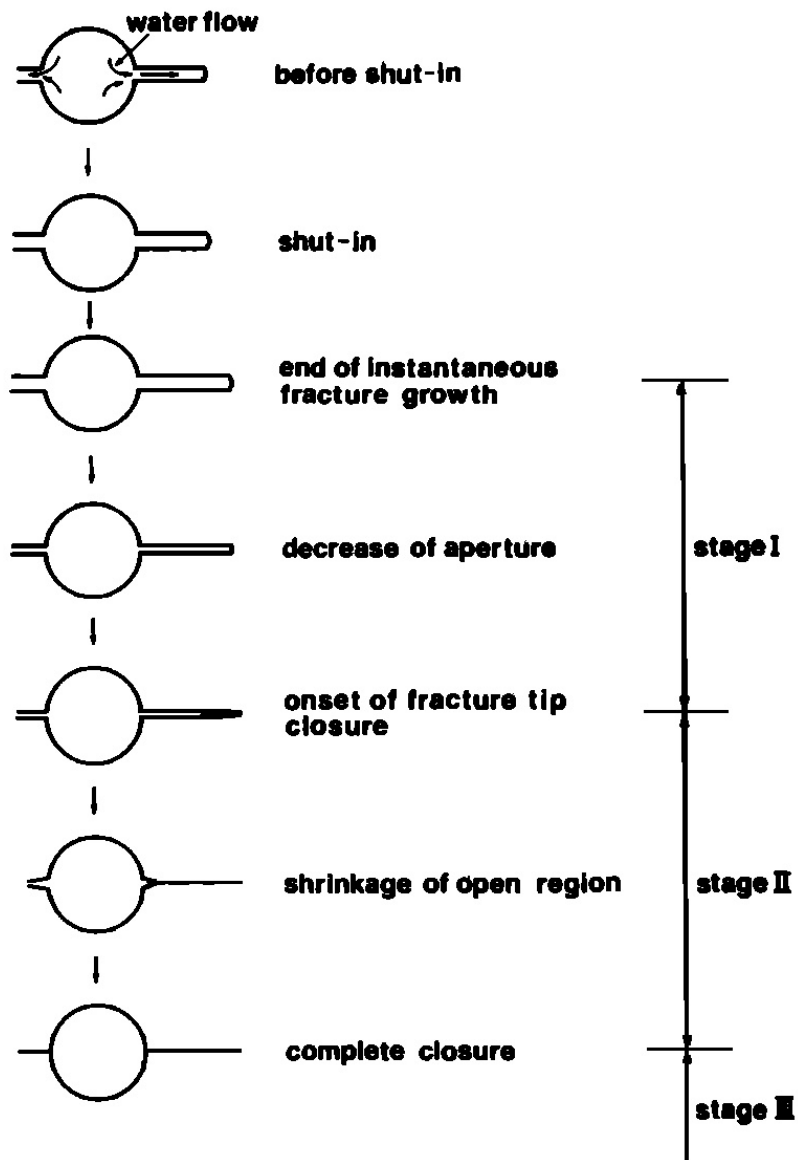
3.4 Standard Måling av innsluttingstrykk (shut in)

Som vist i forrige delkapittel inngår shut in trykket P_s i beregningen av største hovedspenning for testmetoden, i tillegg til å være et direkte mål på normalspenningen i jekket sprekk (se delkapittel 3.3.1). Å måle P_s til sin reelle verdi er derfor kritisk for å gi en god estimering av spenningsforholdene.

Tolking av shut-in trykket skjer i tidsrommet mellom pumpestopp og åpning av trykkventil (se **fig.3.2**). I dette tidsintervallet lukker den hydraulisk jekkede sprekk seg. Basert på en mekanisk forståelse av lukkeprosessen og praktisk erfaring er det etablert en teori der lukkingen inngår i 3 hovedfaser (Hayashi og Haimson 1991):

- Fase 1: Stans av sprekkutvidelse til lukking av sprekkens ende
- Fase 2: Fra lukking av sprekkens ende til lukking av hele sprekk
- Fase 3: Fra fullstendig lukking av sprekk til testslutt

Fig.3.5 beskriver visuelt sprekkens lukking gjennom de tre fasene. Det antas at berget i testen oppfører seg lineært elastisk, og at vannet i sprekk befinner seg i et lukket system. Fasene gir forskjellige mønstre i trykkurven, som til sammen utgjør en "shut-in kurve" (Hayashi og Haimson 1991).



Figur 3.5: framstilling av sprekkelukking under shut-in fasen. Figuren viser et tversnitt av et borhull med hydraulisk framstilt sprekk i hver ende. Etter shut in lukker sprekkene seg gradvis i 3 faser (stages) fram til testslutt. Fra Hayashi og Haimson (1991)

Vanntrykket i sprekken er likt med normalspenningen til sprekken idet sprekker begynner å lukke seg (Haimson og Cornet 2003),(Hayashi og Haimson 1991). Shut-in trykket blir derfor antatt målt ved begynnelsen av sprekkelukking. Dette skjer overgangen fra fase 1 til fase 2. Å kunne detektere denne faseovergangen riktig er derfor essensielt i riktig estimering av spenningsforholdene.

3.4.1 Deteksjon av shut-in trykk fra trykkurve-analyse

Som nevnt innledningsvis i delkapittelet antas vannet i sprekken å være i et lukket system under shut-in. Pumping av vann inn i testseksjonen er her avsluttet og ventilen er enda ikke åpnet for flømming av vann ut. Nedgang i trykk skyldes derfor utelukkende via tap av vannvolum inn bergmassen. Likningen for global massebevarelse i en sprekkefluid kan dermed brukes, først beskrevet av Hayashi og Sakurai (1989):

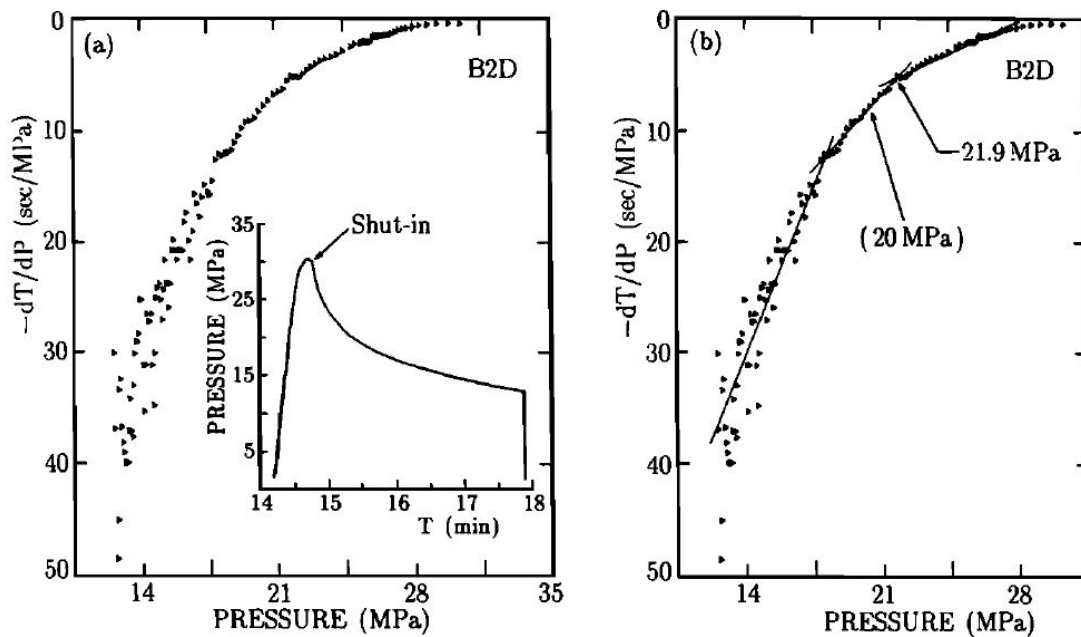
$$\frac{dP}{dt} = - \frac{p_w Q_t}{\frac{d}{dP}(p_w V_c + p_w V_b + M_H)} \quad (3.8)$$

Der $\frac{dP}{dt}$ er endringen av trykk over tid. Telleren i høyre ledd av likning 3.8 beskriver masse-tapet av vann fra sprekken inn i fjellets porer, representert med vannets tetthet p_w multiplisert med vannets volumtap Q_t . Nevneren representerer den eksisterende vannmengden i testseksjonen, der V_c er vannvolumet i den hydraulisk jekkede sprekken, V_b er vannet i testseksjonens borhull og M_H er massen av vann i røret koblet til ventilen og pumpen på overflaten.

Likning 3.8 er viktig i forståelsen av hvordan fase 2 skiller seg ut fra de to andre fasene i trykkkurven. Når sprekken er åpen under fase 1, endres ikke overflatearealet som er tilgjengelig for vannet til å trekke inn i fjellet, fordi lengden på sprekken er stabil. Vannvolumet i sprekken derimot endres av vannlekkasjen, som gjør at bredden på sprekken gradvis minker. Dette vises i "stage 1" i 3.5. Under fase 2 begynner sprekken derimot å lukke seg, og lengden på sprekken reduseres gradvis. En reduksjon av sprekkenes lengde minsker overflatearealet gradvis, som igjen reduserer lekkasjen inn i berget Q_t . I tillegg endres volumtapet av vann i sprekkeområdet V_c som følge av lukkingen. Disse to effektene medfører en endring i $\frac{dP}{dt}$ i overgangen mellom fase 1 og fase 2 av shut-in prosessen (Hayashi og Haimson 1991). Under fase 3 er sprekken lukket. Overflatearealet og volumet av vann er dermed igjen konstant. Fase 3 har derfor tydelige likheter med fase 1 i tolkning av $\frac{dP}{dt}$.

Hayashi og Haimson (1991) oppdaget ut ifra likning 3.8 og det matematiske grunnlaget for vanntapet Q_t at $\frac{dP}{dt}$ opptrer lineært inverst med trykket P under fase 1 og 3, men ikke under fase 2. Dermed kan fasene under shut-in skiller ut ved å plote $\frac{dP}{dt}$ mot P grafisk. Shut-in trykket blir tolket til å være de første punktene som avviker fra den lineære linjen som opptrer i starten (se fig. 3.6).

Det finnes flere andre grafiske metoder for finne shut-in trykket fra trykkdata, som alle baserer seg på det samme prinsippet om å finne overgangen mellom fasene i sprekkelukkingen. ISRM standarden (Haimson og Cornet 2003) nevner $\frac{dP}{dt}$ mot trykket P og $\text{Log}(P)$



Figur 3.6: Eksempel på grafisk analyse av trykkdata med bruk av $\frac{dt}{dP}$ mot P . Figur *a* til venstre viser punktdata av $\frac{dt}{dP}$ mot P , med innlagt graf av trykk mot tid. Figur *b* til høyre viser den grafiske tolkningen av samme graf med regresjonslinjer. Første avvik i regresjonslinje fra makstrykk tolkes som P_s , her målt til 21.9 MPa. I laboratorieforsøket var minste hovedspenning satt opp til 20 MPa. Fra Hayashi og Haimson (1991).

mot tid t som andre grafiske metoder. Disse baseres også på en overgang fra lineær til ikke-lineær kurve i detektering av P_s .

3.5 Mål av P_s ved stegvis trykkjekking

En annen metode for å oppnå måling for shut-in er å stegvis øke og senke vanntrykket i testseksjonen. Her blir både pumperaten og trykket brukt som et datagrunnlag for tolkningen. Metoden er et alternativt supplement til vanlig shut-in tester og kan gjøre i både splitte og jekkeforsøk (Haimson og Cornet 2003). Metoden er og mye brukt i forenklet jekketesting (Ødegaard, Barkved og Nilsen 2019).

Metoden kan deles inn to faser, der den første fasen består av stegvis trykkoppbygging, mens det under den andre fasen utføres en stegvis trykkreduksjon. Stegene for trykkoppbygging og nedbygging er her av samme grad, det vil si at et steg ikke skal øke eller synke i trykk mer en de andre stegene under testen. Mellom stegene holdes trykket konstant over en liten periode. Pumperaten monitoreres kontinuerlig for å opprettholde trykket til en konstant verdi. Resultatet av dette er at vi får en trykkurve med en trappeaktig form, mens pumperaten får større variasjon.

3.5.1 Stegvis Lugeon testing

Stegvis økning av injeksjonstrykk er derimot ikke en ny testmetode. Metoden har siden 1970 - tallet vært brukt i vannkraftsindustrien for å estimere vanntapet til berget i trykk-tunneler, og ble beskrevet først av Houlsby (1976). Houlsby definerte tre trykksteg under pumping blir, a, b og c, der a er lavt trykk, b er medium trykk og c er makstrykk. En test blir så utført i 5 pumpesteg

- Steg 1: Pumping lavt trykk *a*
- Steg 2: Pumpeøkning til medium trykk *b*
- Steg 3: Pumpeøkning til makstrykk *c*
- Steg 4: Pumpereduksjon til medium trykk *b*
- Steg 5: Pumpereduksjon til lavt trykk *a*

Hvert av stegene holdes stabilt i 10 minutter for å få en god måling av vanntapet.

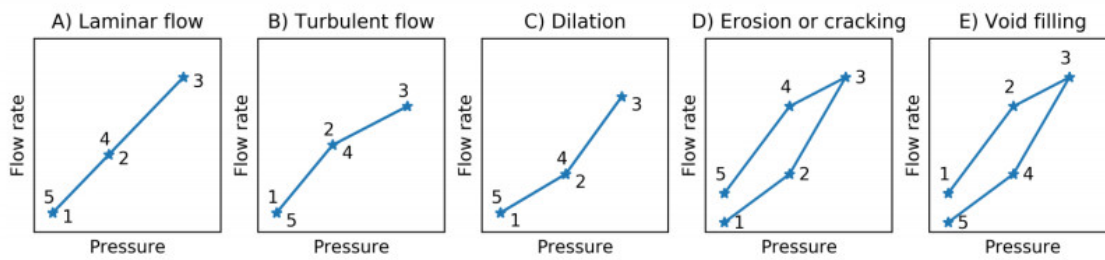
Metoden er kjent som en stegvis Lugeon test (Nilsen og Palmström 2000). Vanntapet måles i lugeon - verdien L , definert som vanntapet i liter per minutt og per meter borhull i testseksjonen ved et overtrykk på 1 MPa (Lugeon 1933).

$$L = \frac{p_L q}{L_t p} \quad (3.9)$$

Der p_L er overtrykket på 1 MPa, L_t er lengden på testseksjonen i borhullet, q er flowraten og p er injeksjonstrykket. Merk at Lugeon verdien ikke endres hvis forholdet mellom flowrate og injeksjonstrykk holdes konstant. Houlsby (1976) påpeker at en slik konstant relasjon kan bare inntreffe hvis det forekommer laminær strømming av vann fra borhullet inn i bergmassen. Hvis målingene derimot viser at Lugeon-verdien varierer sterkt i de ulike trykkstegene, må andre faktorer beregnes å påvirke vanntapet.

Fem ulike grupper for vanntap i borhull har derfor blitt kategorisert i tolkningen av stegvise Lugeon tester. Gruppene er illustrert og forklart i vedlegg A, utviklet av Houlsby (1976). Gruppene kan kategoriseres med hensyn på injeksjonstrykket:

- Laminær strømming: Lugeon-verdien holdes konstant for alle endringer i trykksteg
- Turbulent strømming: Lugeon-verdien avtar under trykkøkning men øker igjen under trykknedgang
- Dilatasjon: Lugeon-verdien øker kraftig under makstrykk
- Utvasking av sprekke materiale: Lugeon-verdien øker med tid uavhengig av trykkendring



Figur 3.7: Strømningsrate mot trykk under en stegvis lugeon test. Hver graf representerer trenden for hver kategori satt opp av Houlsby (1976). De nummererte punktene på grafen representerer de ulike trykkstegene under testen. En merkbart økning i flowrate kan ses i trykksteg 3 under dilatasjon (dilation). fra Gundersen et al. (2019)

- Innfylling av sprekkemateriale: Lugeon-verdien minker med tid uavhengig av trykk-
endring.

For detaljert beskrivelse av hver enkelt gruppe, se Houlsby (1976) og vedlegg A. I en hydraulisk splitte og jekke-sammenheng er det kategorien dilatasjon som er mest relevant.

3.5.2 Vanntap ved dilatasjon

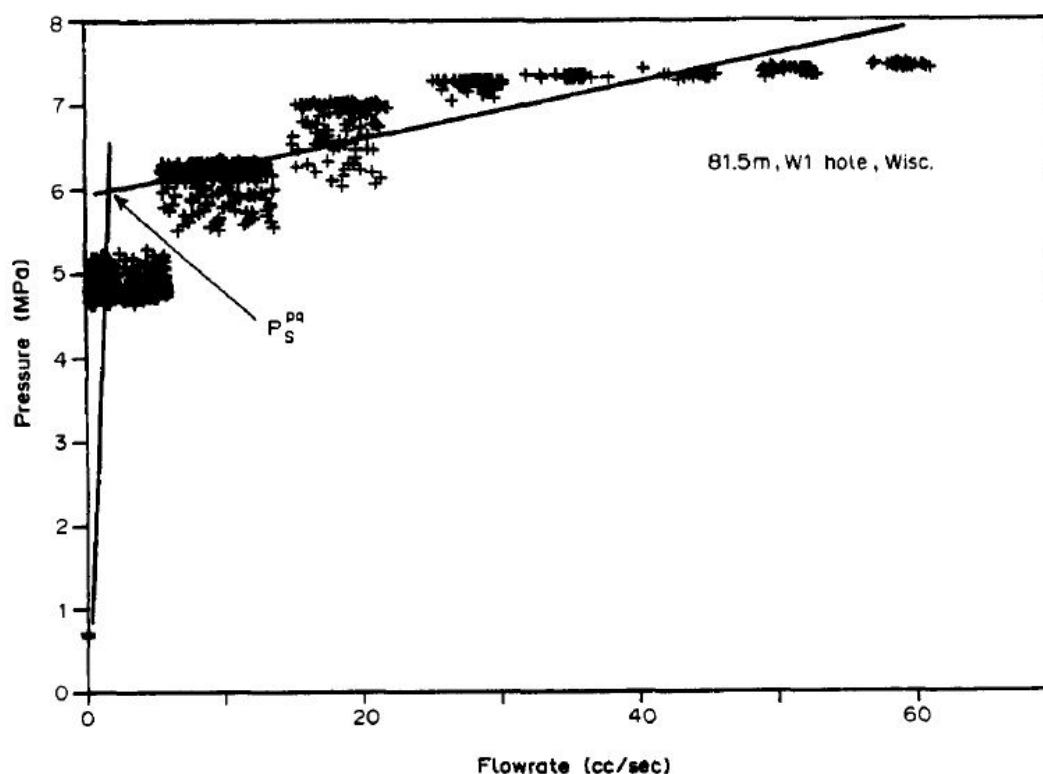
Karakteristiske Lugeon og trykk-verdier for dilatasjon er oppført under "dilation" i vedlegg A. Begrepet dilatasjon betyr utvidelse, som i denne sammenheng er knyttet til utvidelse av borhullsseksjonen. Denne utvidelsen skjer i hovedsak ved jekking av sprekk, som fører til en utvidelse av overflatearealet til testområdet, og dermed økt hydraulisk konduktivitet. (Quiñones-Rozo 2010).

Siden jekking av sprekk bare inntreffer der injeksjonstrykket overgår minste hovedspenning, er en endring i Lugeon verdi under makstrykk nyttig informasjon for å kunne vite om jekking av sprekk har inntruffet eller ikke. I **Fig. 3.7** kategori C vises det hvordan vanntap som følge av jekking av sprekk kan skilles fra andre mekanismer under en stegvis lugeon test.

Med dette grunnlaget kan vanntapet under stegvis trykktesting gi oss informasjon om når den jekkede sprekk lukker seg. I analysen for en stegvis lugeon test er det likevel ikke åpning og lukking av sprekk som er fokuset, og det kategoriseres heller som et avvik i vanntapmålingen (Houlsby 1976).

3.5.3 Tolkning av shut-in trykket

Teorien om dilatasjon i vanntapmålinger kan brukes til å si oss noe om når sprekk åpner og lukker seg som funksjon av vanntapet. Kombinert med trykkdata gir dette videre et mål for injeksjonstrykket som oppstår under lukking. Dette er basisen for den syklisk hydrauliske testmetoden, standardisert i ISRM (Haimson og Cornet 2003).



Figur 3.8: Bilineær tolkning av en stegvis trykktest. Plottet består av injeksjonstrykket i y-akse og flowraten i x-akse. To lineære faser i vanntapet representeres ved to lineære linjer, for før og etter lukking av sprekk. Krysningspunktet mellom linjene representerer shut-in trykket P_s . Fra Lee og Haimson (1989).

ISRM standarden henviser til Rutqvist og Stephansson (1996) i sin beskrivelse av metoden. Her gjennomføres den samme stegvise trykkøkningen som vist fra Houlsby (1976). Forskjellen ligger i antallet trykksteg i testen. For å kunne vite under hvilke trykk vanntapet endrer seg som følge av åpning og lukking av sprekk, er det hensiktsmessig å ha så mange trykksteg som mulig. Derfor opereres det gjerne med flere trykksteg enn beskrevet i den stegvise lugeon-testen.

Det er videre to spenningparametre som er representert i i den stegvise jekkeprosessen. Trykket ved åpning av sprekk blir representert som gjenåpningstrykket P_r , mens trykket ved lukking av sprekk blir tolket som shut-in trykket, P_s . Siden P_s er et uttrykk for sprekens normalspenning (se delkapittel 3.4), er det den stegvise trykknedgangen som er interessant i deteksjon av minste hovedspenning. En bilineær tolkning av trykk mot flowrate benyttes av trykk mot vanntap for å detektere P_s (se **fig. 3.8**), beskrevet i Lee og Haimson (1989) og Haimson og Cornet (2003). En bilineær tolkning beskriver to lineære systemer som skiller seg før og etter lukking av sprekk. P_s måles der de to lineære systemene møtes i et krysningpunkt.

3.5.4 Fordeler og ulemper med stegvis trykktest

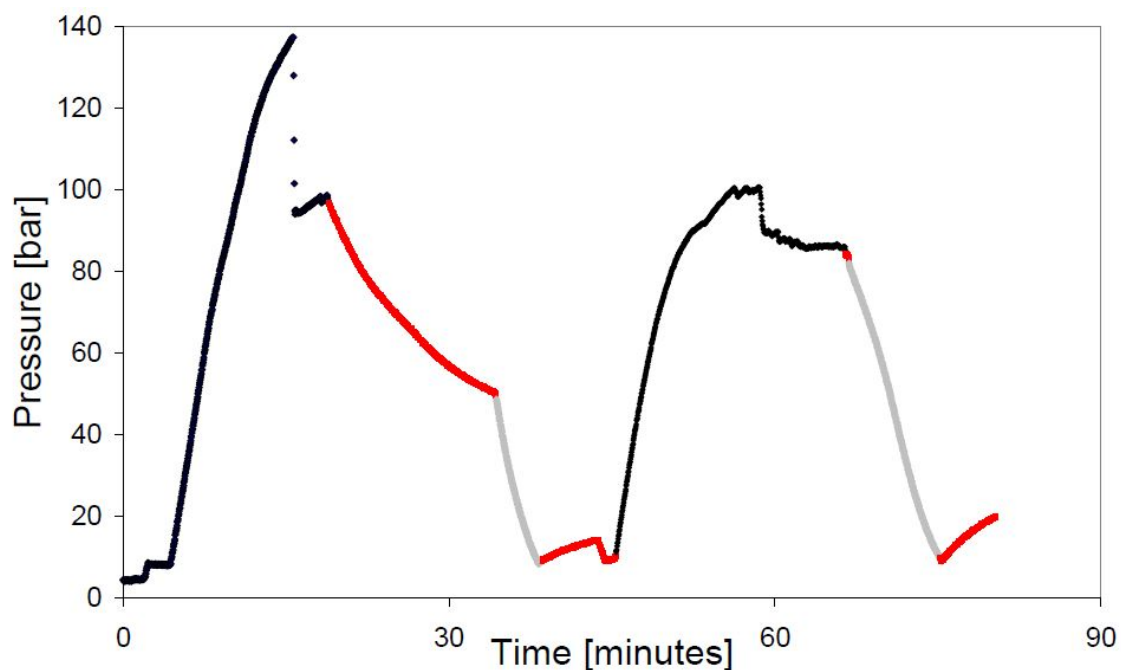
Fordelen med denne metoden ovenfor en vanlig shut-in analyse ligger i testens stabilitet. Ved å opprettholde konstante trykksteg over tid vil åpning og lukking av sprekk enklere skille seg ut i dataene framfor å analysere korte tidsrom under shut-in. Dette gjør det lettere å unngå grove feil i tolkning av P_s . En svakhet oppstår likevel i form av å peke ut eksakt verdi for P_s . Siden dataene ikke viser hvordan vanntapet oppfører seg mellom trykkstegene, oppstår det blindsoner i dataene. En endring i 0,5 MPa mellom hvert trykksteg vil for eksempel gi en usikkerhet på 0,5 MPa i tolkningen av P_s . slike feil kan føre til feilforplantning i den videre spenningsanalysen.

ISRM standarden anbefaler derfor å gjennomføre både konvensjonell testing med shut-in og stegvis jekketest innenfor samme prøvesyklus (Haimson og Cornet 2003). Tolkningen av P_s kan sammenstiles ut ifra begge metodene og gi et sikrere grunnlag for den totale spenningsanalysen.

3.6 Flowback metoden

I petroleumsindustrien, hvor tester av hydraulisk frakturing er et viktig tema, er det benyttet en testmetode som ikke står beskrevet i ISRM standarden. Metoden kalles for *pump-in/flowback test*, og har vært brukt i petroleumsindustrien i flere tiår (De Bree og Walters 1989), (Raaen et al. 2001). Metoden følger det samme testoppsettet som i ISRM standarden, med unntak av en strupning ved ventilutgang (se **fig. 3.10**). Under en testutførelse økes trykket på samme måte som under en vanlig hydraulisk splitte/jekke prosess med konstant flow til hydraulisk sprekk er åpnet. Forskjellen ligger i prosedyren for lukking av sprekk. Istedenfor å stanse pumping av vann inn i testseksjonen som under shut-in fasen, åpnes heller trykkventilen til overflaten. Dermed strømmer trykkutsatt vann opp til overflaten igjen, som gir et umiddelbart trykknedgang i testseksjonen og lukking av sprekk. Ordet flowback betyr tilbakestrømning, knyttet til tilbakestrømningen av vannet fra testseksjon og ut gjennom strupningen.

Siden flowback gir et massetap av vann under trykknedgang ut i overflaten, opptrer lukkingen av sprekk annerledes og raskere enn under en shut-in test. Dermed opptrer også trykkkurven annerledes. **Fig. 3.9** viser trykkdata under både innpumping, shut in og flowback. Som figuren viser gir flowback og shut in ulike trykkreponser. Første syklus viser en typisk trykkurve for shut-in metoden, mens andre syklus representerer trykkrespons under gjennomføring av flowback-metoden.



Figur 3.9: Trykkdata for to sykluser av hydraulisk splitting og jekking. Innpumpings-fase er markert svart, shut-in fase rødt og flowback-fase med grått. Første syklus viser en shut-in fase etter innpumping som avsluttes med flowback. Andre syklus viser flowback rett etter innpumping. Fra Gederaas et al. (2009).

3.6.1 System stivhet modellen

Tolkningen av trykkurven under flowback tar utgangspunkt i samme prinsipp om massebevarelse som under shut-in. Videre antas det at tettheten i vannet som brukes under testutførelsen har en konstant tetthet og er ikke-kompressibel. Med en konstant tetthet kan massen defineres i volum, og vannvolumet som tilføres eller fratras testseksjonen vil dermed direkte påvirke trykkresponsen i testen. Forholdet mellom endringen i trykk og volum er definert som system stivheten (Raaen et al. 2001), og kan defineres følgende.

$$S = \frac{dP}{dV} \quad (3.10)$$

Der S er system stivheten, dP er endring i vanntrykk og dV er endring vannvolum. Gitt at vi vet endringen i trykk og volum over tid, kan likning 3.10 dermed gi et mål på system stivheten (Raaen et al. 2001).

Ifølge Raaen et al. (2001), påvirkes system stivheten av to mekanismer.

- Den hydrostatiske kompresjonen/dekompresjonen av vannvolumet i testbrønnen (også kalt brønnstivhet)
- Elastisiteten i den hydrauliske jekkede sprekken. (sprekkestivheten)

Av disse to mekanismene er det sprekkestivheten som endrer seg under lukking av sprekke (Raaen et al. 2001). Endringen kan forklares med fasene under sprekkelukking (Hayashi

og Haimson 1991). Under fase 1 lukker sprekken som en ”hengsel”. Det vil si at lengden på sprekken er konstant, mens bredden reduseres. Under fase 2 reduseres selve lengden på sprekken. Ifølge grunnleggende sprekkemodeller er sprekkestivheten uavhengig av bredden på sprekken, men ikke av sprekkenes lengde (Gederaas et al. 2009). Derfor vil sprekkestivheten holde seg konstant under fase 1, men endre seg under fase 2. En endring i sprekkestivhet vil dermed kunne detektere overgangen fra fase 1 til fase 2, og bestemme normalspenningen til sprekken her på samme måte som under vanlig shut-in prosedyre.

Siden den totale stivheten i systemet er summen av brønnstivheten og sprekkestivheten, er det viktig at sprekken er stor nok til å kunne gi utslag på målingene. Hvis ikke vil brønnstivheten dominere og endring i stivhet som følge av sprekkelukking bli vanskelig å detektere (Gederaas et al. 2009).

Fig. 3.10 viser en simplifisert modell for en flowback-test, delt opp i volum og stivhetssystemer. Modellens ulike systemer for volum er nærmere beskrevet i delseksjon 3.6.2, mens bakgrunnen for strupningen (choke) er beskrevet i delseksjon 3.6.3.

3.6.2 Direkte måling av system stivhet

Siden endring i system stivhet kan brukes til å detektere overgangen i sprekkelukkingen, vil målinger av system stivhet kunne brukes til å finne trykket som tilsvarer sprekkenes normalspenning. Gitt at både trykket og volumet kan måles kontinuerlig, kan dette bli gjennomført via likning 3.10.

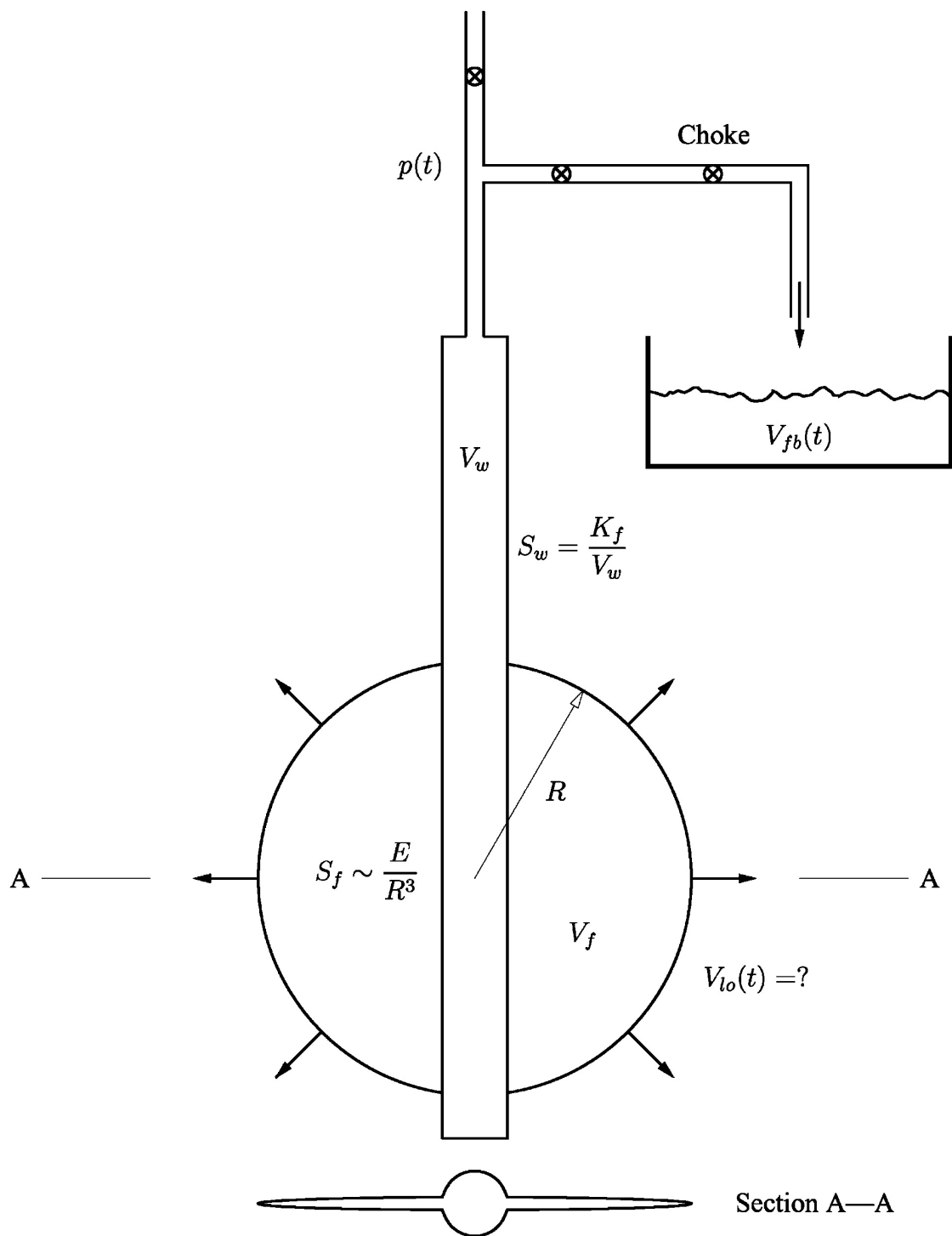
Av endring i vanntrykk og vannvolum er det knyttet størst usikkerhet til måling av vannvolum. Endring i vannvolum følger to mekanismer, lekkasje ut i bergmassen og via kontrollert flowback til overflaten (Raaen et al. 2001). Av disse mekanismene er det kun kontrollert flowback det er mulig å måle. Derfor kan målinger av vannvolum kun benyttes hvis den kontrollerte flowbacken er mye større enn vanntapet ut i berget.

Gitt at trykket og volumet kan korrekt måles, kan forholdene mellom de to parametrene brukes til å vise endringen i system stivhet. **Fig. 3.11** viser en forenklet modell av en trykk-volum kurve, der lukking av sprekke inntreffer der grafen danner et momentant knekk i stigningstallet. Utifra likning 3.10 vet vi at stigningstallet representerer system stivheten S .

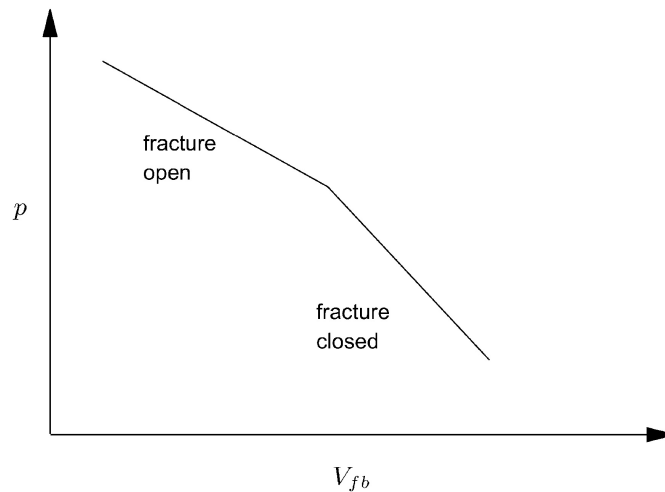
Siden endringen i system stivhet tolkes som begynnelse av lukking av sprekke, blir trykkmålingen her tolket som lik sprekkenes normalspenning. Dermed kan en grafisk fremstilling av trykk mot volum under flowback gi et klart mål av normalspenningen til sprekken, gitt at tapet i vannvolum er styrt av kontrollert flowback (Raaen et al. 2001).

3.6.3 Tolkning av system stivhet uten volummåling

Hvis volummålinger av flowback ikke er tilgjengelig må testen analyseres av trykkets utvikling over tid. Utfordringen med dette er å kunne vite relasjonen mellom trykk og volumtap under flowback. Likning 3.10 impliserer at systemets endring i volum og stivhet



Figur 3.10: Simplifisert modell for flowback. Modellen er delt i to systemer, brønn og sprekk. Volum og stivhet i brønn (well) er benevnt V_w og S_w , for sprekk (fracture) S_f og V_f . Sprekkestivheten S_f styres av sprekkens lengderadius R og elastisitet E . Videre opptrer volumtap av væske via lekkasje (loss) til berget V_{lo} og via flowback V_{fb} . V_{fb} styres indirekte av strupning (choke) i dette tilfellet, mens V_{lo} er ukjent. Tverrsnitt A-A viser brønnen sett ovenfra. Fra Raaen et al. (2001)



Figur 3.11: Grafisk framstilling av forholdet mellom trykk p og volum V_{fb} under lukking av sprekk i flowback analyse. Fra Raaen et al. (2001).

over tid kan brukes til å direkte predikere trykkets endring over tid.

Raaen et al. (2001) introduserte en konstant strupning til testmetoden får å kunne kontrollere tilbakestrømmingen uten volummåling. I motsetning til å holde flowraten på et bestemt nivå, som hele tiden må justeres, minsker strupningen støy i måling når justering ikke lenger er nødvendig. Ved å introdusere en strupning under flowback kan endring i vanntapet måles ut ifra endringen i vanntrykket ved strupehodet, definert med likning 3.11 (Raaen et al. 2001).

$$\frac{dV_{fb}}{dt} = \zeta \sqrt{p(t) - p_0} \quad (3.11)$$

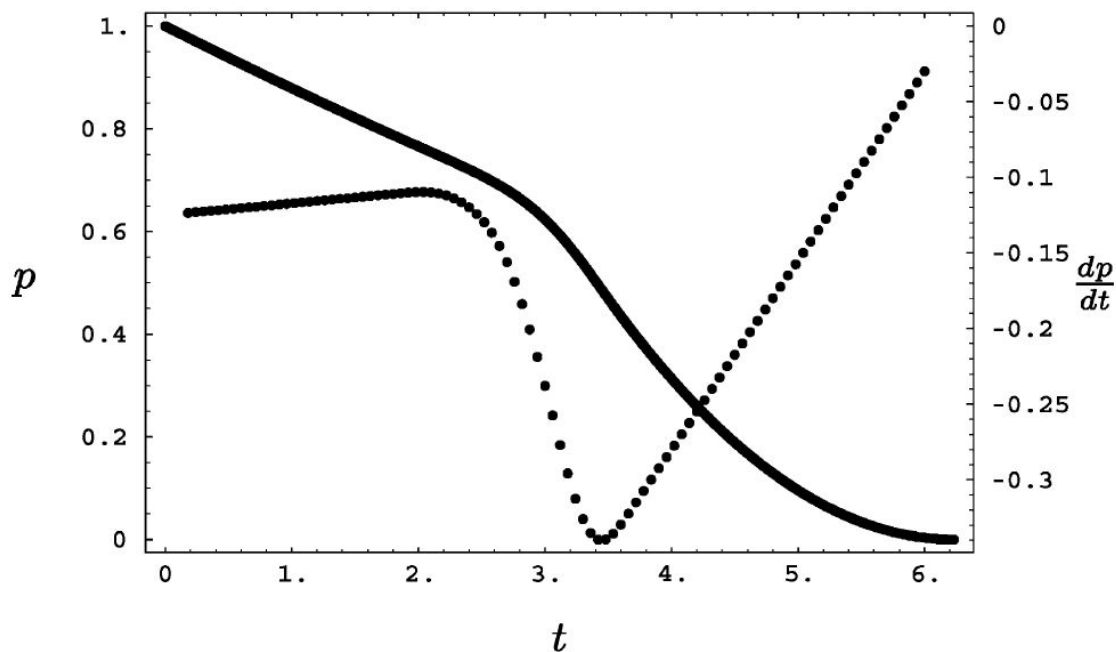
Der $\frac{dV_{fb}}{dt}$ er strømningsraten gjennom strupningen under flowback. ζ er konstante strupningen. $p(t)$ er vanntrykket i testsystemet og p_0 er det atmosfæriske lufttrykket. Likning 3.11 er en enkel fluidmekanisk relasjon mellom endring i trykk og strømningsrate basert på bernoullis energilov for væsker. Kombinert med likning 3.10 kan en differensiallikning for trykk som en funksjon av system stivhet S og tid t bli beskrevet.

$$\implies \frac{dp}{dt} = -S\zeta \sqrt{p(t) - p_0} \quad (3.12)$$

Differensiallikning 3.12 kan løses med hensyn på at trykk over tid er kjent under flowback

$$\implies p(t) = \left(\sqrt{p(0) - p_0} - \frac{S\zeta}{2} t \right)^2 + p_0 \quad (3.13)$$

Der $p(0)$ er trykket ved begynnelsen av flowback ($t=0$). Likning 3.13 gir et matematisk grunnlag for å kunne analysere endring i system stivhet kun ut ifra trykk og tidsdata (Raaen et al. 2001).



Figur 3.12: Modell av trykk og den trykkderiverte som funksjon av tid, i henholdsvis primær og sekundær y-akse. Sprekkelukking inntreffer på $t = 2$ s, og er fullstendig lukket på $t = 3,5$ s. Fra Raaen et al. (2001).

3.6.4 Grafisk tolkning av trykkdata under flowback

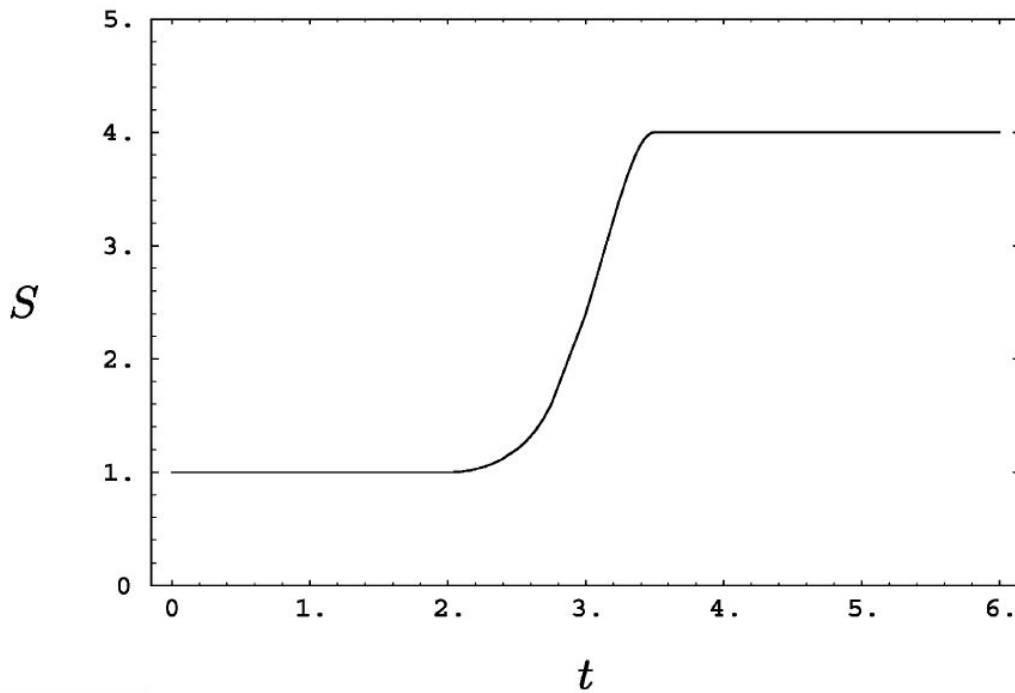
Ut ifra likning 3.13 finnes det flere måter å tolke endringer i systemets stivhet på grafisk. I denne delseksjonen vil to av metodene bli beskrevet. For grafisk tolkning av trykkdata med kvadratrot av tid henvises det til Raaen et al. (2001).

Likning 3.13 viser at trykk og tid opptrer ikke-lineært med hverandre under flowback. Det er derfor vanskelig å detektere endringer i S direkte fra trykk mot tid. Den tidsderiverte av trykket derimot gir oss følgende.

$$\frac{dp}{dt} = -S\zeta\sqrt{p(0) - p_0} - \frac{1}{2}S^2\zeta^2t \quad (3.14)$$

Som likning 3.14 viser er den tidsderiverte av trykk lineært avhengig av tid. Den viser at så lenge system stivheten S er konstant vil grafen for $\frac{dp}{dt}$ mot tid oppføre seg lineært (Raaen et al. 2001).

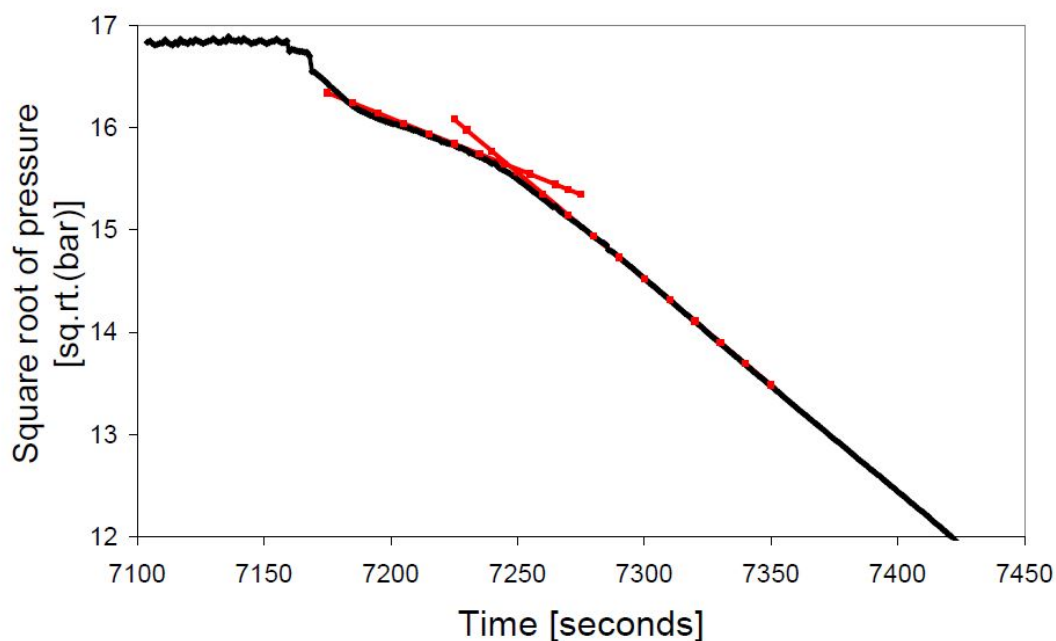
Fig. 3.12 viser hvordan den trykkderiverte responderer over tid under flowback. **Fig. 3.13** viser system stivhetens endring over samme tid. Før og etter lukking av sprekk opptrer den trykkderiverte tilnærmet lineært. Når sprekken lukker seg og system stivheten endrer seg som et resultat av dette, kan den deriverte brukes til å detektere tidspunktet der sprekken begynner å lukke seg. I tilfellet til **Fig. 3.12** vil lukking av sprekk og dermed målet på sprekkens normalspenning inntreffe ved 2 sekund i grafen.



Figur 3.13: System stivhet mot tid i samme modell som **Fig. 3.12** (Raaen et al. 2001).

En annen måte å tolke stivheten på er å plote kvadratroten av trykk mot tid. Ut ifra likning 3.13 ser vi at $\sqrt{p(t) - p_0}$ oppfører seg lineært mot tid. Dermed kan endringer i linearitet bidra til endring i system stivheten S .

Fig. 3.14 viser et eksempel på hvordan trykkets kvadratrott \sqrt{p} kan brukes til å tolke tidspunkt for lukking av sprekk. Lukkingen av sprekk og den tilsvarende endringen i S bidrar til å gi et "knekk" i grafen for \sqrt{p} mot tid. Knekkpunktet kan detekteres ved å trekke lineære regresjonlinjer fra hver side av grafen



Figur 3.14: Kvadratrot av trykk mot tid under flowback-fasen. De røde regresjonslinjene er laget for å finne ut når \sqrt{p} avviker fra linearitet. En signifikant endring i system stivheten tolkes ved 7250 sekund. Fra Gederaas et al. (2009).

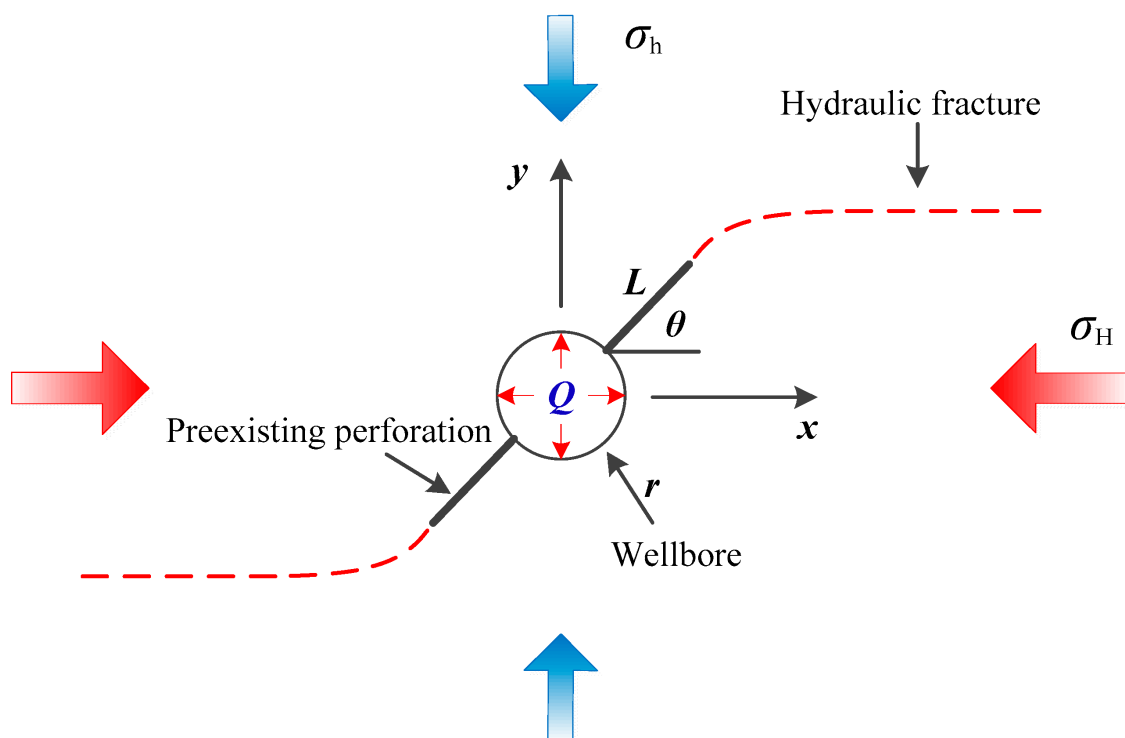
3.7 Uønskede effekter under testing

I utførelse av hydrauliske splitte- og jekketester kan det hende dataene ikke stemmer med forventningene. Så langt i kapitlet har idealiserte data og modeller blitt brukt for å beskrive ulike metoder for tolkning av in situ spenninger. Avvik av ideelle forhold er viktig å detektere for å unngå feil i tolkning og for å forstå grunnforholdene i testområdet. Dette kapitlet går gjennom avvik som kan forventes i oppgavens resultat.

3.7.1 Ugunstig sprekkegeometri

I ISRM standarden antas det at jekking av sprekke inntreffer normalt på minste hovedspenning. Videre antas det at sprekkeplanet utvikler seg med samme strøk og fall utover planet. I virkeligheten kan det forekomme naturlige diskontinuiteter i testseksjonens borvegg. Disse er viktig å oppdage for å kunne tolke spenningsforholdene korrekt (Liu et al. 2018).

Fig. 3.15 viser et eksempel på påvirkningen av en eksisterende sprekke i borvegg. Hvis strekkstyrken i borveggenes bergmateriale er høy, vil jekking av naturlig sprekke kunne inntreffe før splitting av kunstig sprekke normalt på minste hovedspenning. Opptrer dette vil videre splitting av sprekke kunne dreie om normalt på minste hovedspenning videre vekk fra borhullet. Resultatet er et omdreid sprekkeplan med varierende normalspenning langs planet.



Figur 3.15: Horisontalt tverrsnitt av hydraulisk splitting med to symmetrisk eksisterende diskontinuiteter langs borveggen. Fra Liu et al. (2018)

Et omdreid sprekkeplan gir en kompleks tolkning av hovedspenningene. Siden normalspenningen varierer vil shut-in trykket her være vanskelig å finne, og kan heller ikke tolkes til å være lik minste hovedspenning. En pinch-off effekt ved sprekens utgang kan og forekomme, beskrevet nærmere i delseksjon 3.7.3 Det er derfor viktig å oppdage naturlig forekommende sprekker i forkant av testutførelse (se delkapittel 3.1), og ideelt unngå dem.

3.7.2 Vannlekkasje under testing

Massebalanse og riktig mål av volumtap er viktige elementer for å kunne korrekt tolke spenningene ut ifra trykkdata. Det er derimot ikke alltid antagelsene om massebevaring under shut-in og minimal vannlekkasje til berget under flowback gjelder.

Et eksempel på en naturlig lekkasjeeffekt under testing er utvikling av kontakt mellom splittet hydraulisk sprekke og en naturlig eksisterende sprekke. Dette oppstår som følge av splittingens forplantning inn i bergmassen (Yew og Weng 2014). Vannet i den hydraulisk splittede sprekken lekker ut langs med det naturlige sprekkeplanet. Resultatet er økt vannlekkasje som igjen gir utslag på trykkmålingene. Under laboratorieforsøk kan lekkasje forekomme som følge av vannlekkasje ut av laboratorieprøve.

En vannlekkasje ut i en naturlig sprekke vil forstyrre tolkningen av trykkmålinger. Fra delkapittel 3.4 og likning 3.8 vet vi at grunnlaget for en shut-in analyse baserer seg på et lukket system med massebevarelse. En lekkasje ut i en eksisterende sprekke vil gi et ekstra

ledd til analysen og komplisere tolkningen av shut-in trykket.

Samme effekt inntreffer og for analyse av flowback. Gitt at det foreligger en høy grad av vanntap inn i den hydrauliske sprekk vil effekten av lekkasje dominere over endringen i system stivhet (Raaen et al. 2001). Dermed kan en tolkning av spenninger basert på system stivhet bli vanskelige.

3.7.3 Pinch-off effekt

En hydraulisk jekket sprekk vil lukke seg idet normalspenningen til sprekk overgår vanntrykket. Normalspenning er derimot ikke konstant langs med sprekk, og varierer ut ifra avstanden til borveggen. Nærme borveggen vil tangensialspenningene dominere, som er sterkt påvirket etter hvor anisotrope spenningsforholdene er.

I tilfeller sprekkens normalspenning er størst ved borveggen, kan dette føre til en prematur lukking av sprekk i borvegg, mens resten av sprekk fortsatt er åpen. Dette fenomenet kalles for pinch-off effekten (Gederaas et al. 2009). Effekten kan oppstå hovedsaklig hvis sprekk oppstår ugunstig ved borvegg, utenfor området for minste tangensialspenning. Her vil sprekk ha en normalspenning som kan overgå minste hovedspenning, og dermed lukkes sprekk først ved borveggen.

En pinch-off effekt fører til redusert tilbakestrømning av vannet i sprekk, som gir utslag i en tregere trykkreduksjon. Deteksjon av minste hovedspenning er her vanskelig siden lukking av sprekk inntreffer ved et høyere trykk. En måte å detektere pinch-off er å benytte seg av en flowback prosedyre etterfulgt med shut-in. Gitt at vannet fortsatt eksisterer i sprekk etter flowback som følge av en pinch-off effekt, vil det fortsette å strømme inn vann til borhullet i løpet av shut-in fasen. Dette kan gi en liten økning i vanntrykket under shut-in (Gederaas et al. 2009). **Fig. 3.9** viser en slik økning under shut-in ved avslutningen av hver testsyklus.

Kapittel 4

Akustisk Emisjon

I dette kapitlet vil teori og praktisk bruk av akustisk emisjon bli presentert. En grov innføring signalbehandling fra analogt til digitalt signal av akustisk emisjon er beskrevet. For oppsett av sensorer og spesifikasjoner av maskinvaren brukt for akustisk emisjon, henvises det til kapittel 5.

Akustisk emisjon (AE) testing er en unik teknikk for å analysere fysiske endringer i et materiale over tid (Grosse og Ohtsu 2008). AE testing benytter plasserte lydsensorer i kontakt med materiale, og er betraktet som en passiv ikke-destruktiv testmetode. Det vil si at AE signaler kan måles uten å bidra til ødeleggelser i materiale, men må kombineres med en destruktiv metode (som hydraulisk splitting/jekking) for å kunne gi respons. AE testing ble først benyttet i arbeid med betong, men har senere blitt utviklet til å kunne gjelde alle faste materialer (Grosse og Ohtsu 2008).

4.1 Akustisk emisjons teori

Dette delkapitlet refererer til boken "Acoustic emission testing" (Grosse og Ohtsu 2008), med mindre annet er gitt.

Akustisk emisjon kan defineres som en spontan utløsning av deformasjonsenergi i et belastet materiale. Deformasjonsenergien skaper elastiske bølger gjør at en kan "høre" endringen i et materiale. Frigjøring av deformasjonsenergi inntreffer når et materiale går i brudd, som skaper en momentan deformasjon. Lokasjonen av bruddet er definert som hyposenteret til den elastiske bølgen.

Bruddet blir dermed betegnet som kilden til den akustiske emisjonen. Den elastiske bølgen forplanter seg som en kortvarig forflytning i materialets struktur ut fra bruddkilden. Forflytningen er elastisk og følger hookes lov, som betegner forflytningen som en bevegelse i materiale med en resulterende endring i spenning. Bølgen forplanter seg ut fra kilden i

alle retninger med en bestemt hastighet. **Fig. 4.1** viser relasjonen mellom deformasjonen i materiale og den resulterende elastiske bølgen. Den korresponderende hastigheten og spenningen i den elastiske bølgen opptrer som en puls med start og slutt i tid (Pollock 1989). For brudd i mikroskala har pulsen vanligvis en varighet i mikrosekund.

4.1.1 Akustisk emisjon i seismologisk sammenheng

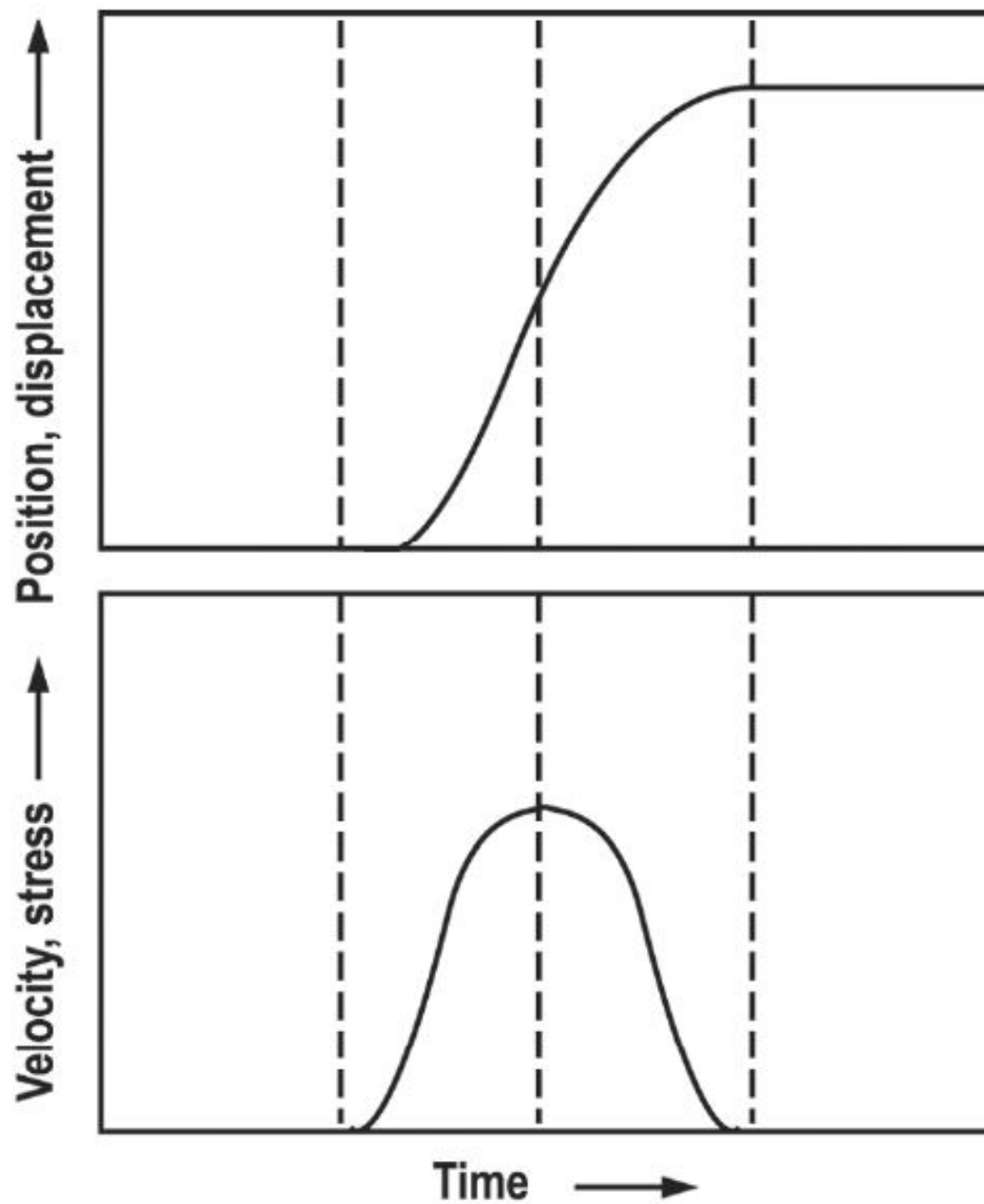
AE kan betegnes som en form for mikroseismisk jordskjelvaktivitet. Jordskjelv oppstår som med AE i form av brudd på et materiale under last, og selve skjelvet er de elastiske bølgene som skapes fra bruddet. AE følger altså de samme fysiske lover som større kontinentale jordskjelv gjør, men på en mindre skala (Grosse og Ohtsu 2008).

Både i sammenheng med jordskjelv og AE kan den elastiske bølgen deles inn i ulike komponenter.

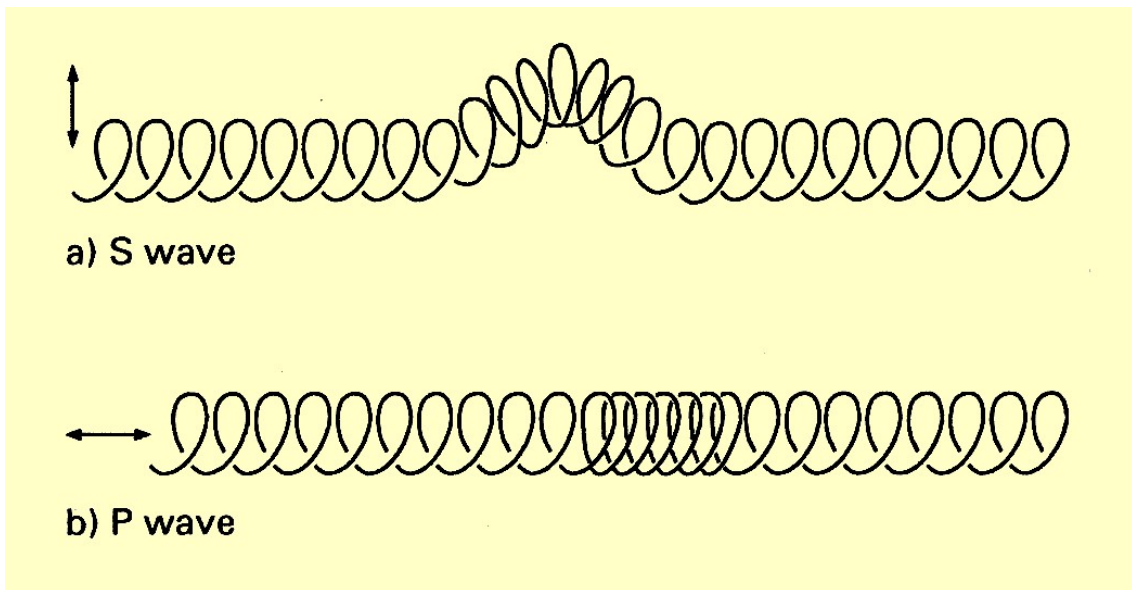
- Primær bølger (P-bølger)
- Sekundær bølger (S-bølger)
- Overflatebølger

P-bølger er trykkbevegelsene i den elastiske bølgen. Trykkbevegelsene beveger seg alltid i samme retning som bølgen forplanter seg og inntreffer først i den fullstendige pulsen. S-bølger er skjærbevegelsene i den elastiske bølgen, og beveger seg normalt med bølgeretningen. S-bølger inntreffer alltid senere enn P-bølger. **Fig. 4.2** illustrerer forskjellene i P- og S-bølgers bevegelse. Overflatebølger opptrer på overflaten av et materiale og har en sirkulær bevegelse. De opptrer alltid etter P og S-bølger.

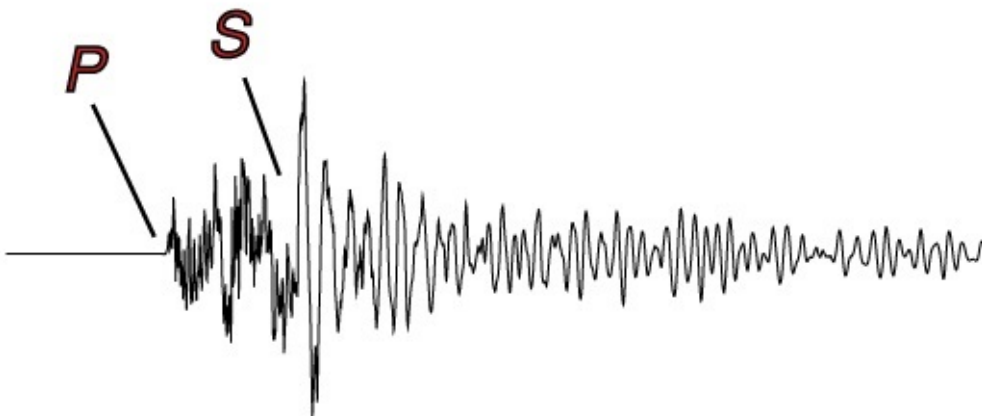
Til sammen utgjør komponentene bølgeformen til et akustisk emisjonssignal. Som en funksjon av mange komponenter består bølgeformen i en akustisk emisjon av flere ulike amplituder og frekvenser. **Fig. 4.3** viser et eksempel på bølgeformen til en elastisk bølge, tatt fra jordskjelvmåling. Delkapittel 4.2 beskriver videre parameterene i bølgeformen som er viktige i tolkning av bruddkilde.



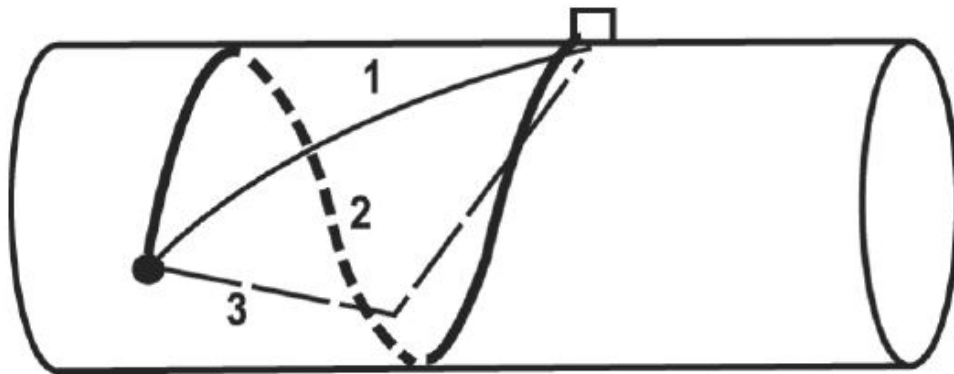
Figur 4.1: Graf av hastighet og spenning i en akustisk emisjonsbølge (nedre bilde), som et resultat av deformasjonen og forflytning i posisjon av bruddkilden (øvre bilde). Fra Pollock (1989).



Figur 4.2: Bevegelser av P- og S-bølger. Fra Landrø (2010)



Figur 4.3: Bølgeformen i et seismisk signal over tid. Svingningene representerer bevegelser i et fast punkt. P-bølger og S-bølger er her tolket i signalet. Fra USGS (2019)



Figur 4.4: Eksempel på tre ulike veier en AE bølge kan forplante seg i et vannrør fra kilde (punkt) til sensor (firkantet figur). 1: Direkte rute. 2: Spiral rute. 3: Vannveien. Fra Pollock (1989)

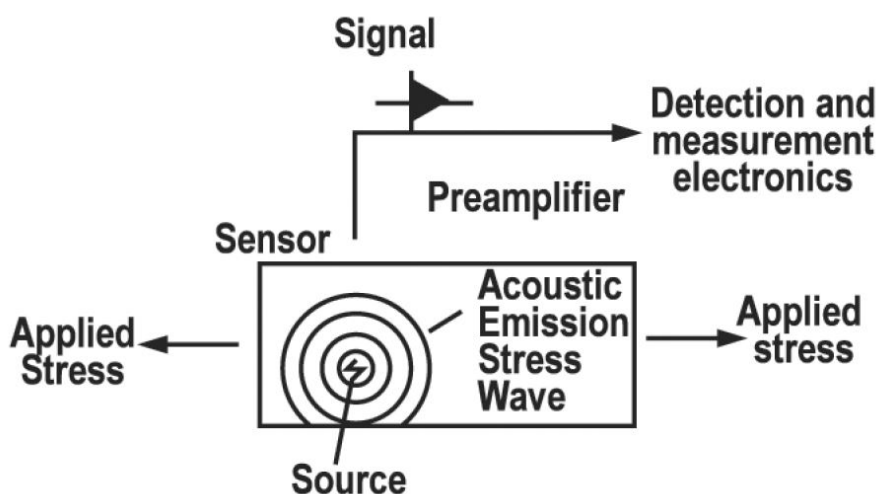
4.1.2 Endring i bølgeform fra kilde

Det er viktig å understreke at parameterene digitalisert fra AE signalet representerer den akustiske emisjonen ved sensoren og ikke selve kilden til signalet. Bølgeformen til den akustiske emisjonen vil endre seg over rom og tid. Derfor er det viktig å vite hva som kan påvirke signalet fra kilde til sensor

Amplituden til et AE signal blir generelt svakere i registreringen enn hva den opprinnelig er. Hovedårsakene til dette skjer gjennom geometrisk spredning og absorpsjon i materialet (Landrø 2010). Geometrisk spredning er et resultat av at den elastiske AE bølgen sprer seg ut som et kuleskall som blir større og større. Som en funksjon av radius fra kilden blir da energien i AE bølgen spredt utover et større område. Absorpsjon av elastiske bølger til materialet skjer primært i overføring av bevegelsesenergi til varmeenergi i friksjon mellom interne mineralkorn. Tilsammen bidrar effektene til en demping av amplituden og redusert energi i et akustisk emisjonsignal. Kunnskapen om demping er viktig med hensyn til plassering av sensorer i forhold til kilde. Ligger sensorene for langt vekk fra kilden kan det være en risiko for den akustiske emisjon ikke blir registrert (Pollock 1989).

Som beskrevet i delseksjon 4.1.1 er bølgeformen i et AE signal summen av sine bølgekomponenter. I analyse av et AE signal sin reise fra kilde til sensor vil bølgekomponentene nødvendigvis ikke følge samme reisevei. For eksempel forplanter overflatebølger seg langs en overflate, mens P og S-bølger forplanter seg internt i et materiale. Videre kan P-bølger forplante seg gjennom vann, noe S-bølger ikke kan (Landrø 2010). Basert på geometrien i testområdet og materialegenskapene vil derfor de ulike bølgekomponentene ha ulik lengde i reisevei. Inneholder reiseveiene ulikheter i materialegenskaper vil dette og endre komponentene hver for seg. Dette strekker ut bølgeformen i tid og endrer den fundamentalt (Pollock 1989). **Fig. 4.4** viser et eksempel på tre ulike veier AE kan forplante seg i et medium.

Summen av effektene resulterer i bølgeformen som sensoren tar opp for måling. Effektene må tas hensyn til for å kunne optimalisere et testområde for måling av AE, og dermed



Figur 4.5: Hovedprinsippene i måling av akustisk emisjon fra kilde til digitalt signal. Fra Pollock (1989).

gjenskape den akustiske emisjonskilden best mulig.

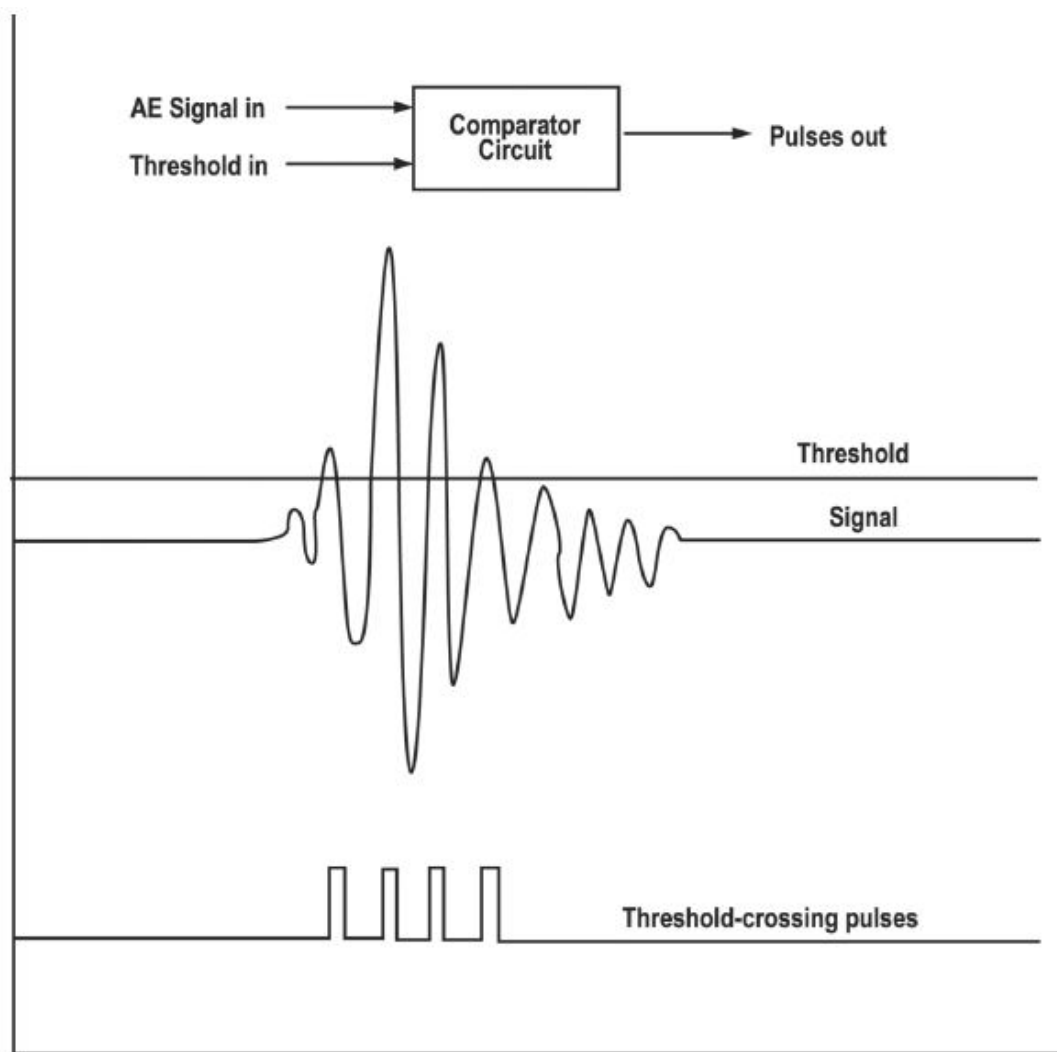
4.2 Måling av akustisk emisjon

Når en elastisk bølge måles er det via bevegelsene som den skaper i et måleinstrument. Måleinstrumentet vil videre oversette det mekaniske signalet i den elastiske bølgen til et elektronisk signal. Overføringen skjer via en sensor med piezoelektriske krystaller. Krystallene, som vanligvis består av kvarts, skaper elektriske spenninger fra de mekaniske vibrasjonene, som gjør at bølgeformen bevares i elektronisk form. Direkte kontakt mellom sensor og materialet er her viktig for at sensoren skal registrere vibrasjonene riktig. **Fig. 4.5** viser de viktigste komponentene i måling av AE bølger.

4.2.1 Forforsterker

AE signaler er ofte svake mekanisk som resulterer i et svakt elektronisk signal. Derfor brukes en forforsterker for å øke den elektroniske responsen fra sensoren. Dette gjøres for å unngå at AE signaler skal gå tapt i måling. Videre er det viktig å fjerne støykilder fra andre vibrasjoner i omgivelsene. Dette løses ved å plassere et båndpass filter, som slipper igjennom kun et bestemt intervall av bølgefrequenser. Ved å bestemme frekvensintervallet innefor forventet frekvens for AE signaler, vil støykilder med andre frekvenser fjernes fra målingen. Generelt har AE signaler en høy frekvens sammenliknet med støykilder (Pollock 1989).

Når den elastiske bølgen kommer i kontakt med en elektronisk lydsensor vil sensoren konvertere den mekaniske bølgen om til et elektronisk signal. Dette signalet kan videre forsterkes og behandles digitalt til tolkning av den akustiske emisjonen



Figur 4.6: Overførelse fra analogt til digitalt elektronisk signal. En komparator overfører diskrete spenningspulser når det elektroniske signalet overstiger terskelspenningen. Fra Pollock (1989).

4.2.2 Signalbehandling

Videre må det elektroniske signalet generert av sensoren og forforsterkeren bli omgjort fra et analogt til et digitalt signal. Dette er en svært viktig prosess siden det er det digitale signalet brukeren vil benytte i tolkningen av den akustiske emisjonen (Pollock 1989).

Det digitale signalet skapes av en komparator krets, som er koblet til sensoren. Når det elektriske AE signalet kommer i kontakt med komparator kretsen vil komparatoren gi en digital pulse hvis AE signalet overstiger en bestemt terskelspenning. Terskelspenningen bestemmes av brukeren og er med på å bestemme sensitiviteten i den digitale målingen. En lav terskelspenning vil gi flere svake AE signaler i digital output, mens en høy terskelspenning vil kun gi de sterkeste AE signalene. Sammenhengen mellom input og output i det digitale signalet som funksjon av terskelspenning er vist i **fig.4.6**.

4.2.3 Treff basert parameterisering

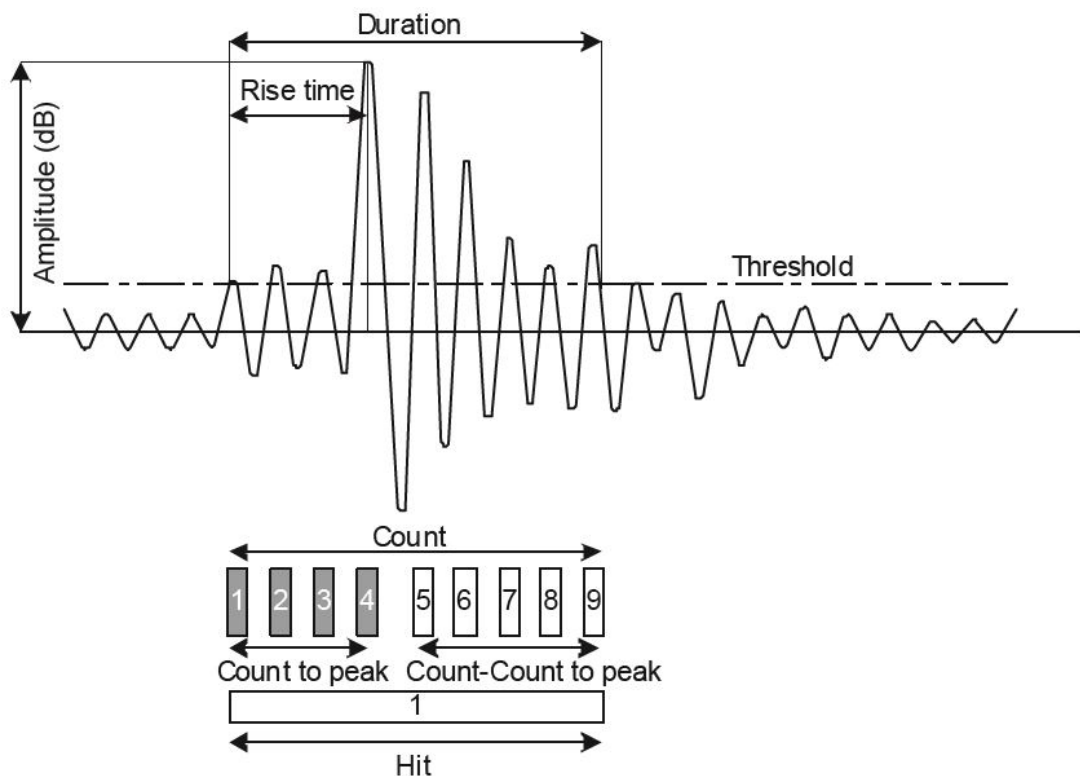
Ut ifra den digitale pulsen definert av terskelspenningen kan det dannes en parametrisk framstilling av det originale AE signalet. Parameterene utgjør brukerens empiriske data av AE signalet, og er derfor viktige for å kunne beskrive best mulig kilden til signalet.

Den enkleste formen for parameterisering av et AE signal er treff-basert parameterisering, som beskriver bølgeformen i et AE signal ut ifra noen enkle parametre. De mest brukte parametrene er beskrevet følgende (Grosse og Ohtsu 2008);

- **Treff:** Et treff (på engelsk: hit) er et AE signal som overgår terskelspenningen. Et treff representerer en bølgeform fra et AE signal, og bestemmer dermed hvor mange AE signaler som fremgår til enhver tid. Det er derfor et godt mål på AE aktiviteten. I **fig. 4.7** fremstår hele bølgeformen et AE treff.
- **Teller (count):** Tall på antall ganger et treff overgår terskelspenningen. På lik linje med treff-parameteren gir tellere et godt mål på AE aktiviteten. Det er den eldste og enkleste metoden for å bestemme AE aktivitet (Pollock 1989). Teller parameteren er sterkt sensitiv til hva terskelspenningen er satt til. I **fig. 4.7** inneholder bølgeformen til et treff 9 counts.
- **Amplitude:** Maksspenningen til et AE signal. Amplituden har enhet i desibel, som er en logaritmisk skala. Spenningen i AE signalet er nært knyttet opp mot styrken til bruddet i AE kilden. Amplituden må likevel betraktes som AE amplituden ved sensor og ikke bruddkilde, siden amplituder i elastiske bølger dempes av geometrisk spredning fra kilde. Amplitude brukes også til å konfigurere terskelspenningen.
- **Varighet (duration):** Et mål på tiden et AE signal bruker. Varighet defineres som tidsintervallet mellom første og siste count i et AE treff.
- **Stigningstid (rise time):** stigningstid er tiden mellom når AE signalet først blir registrert og når signalet når maks amplitude. Stigningstiden er nært relatert til tiden et AE signal bruker fra kilde til sensor og blir også brukt til å klassifisere AE signalet til en bestemt bruddtype.
- **Energi:** Energien til et AE signal er generelt definert som signalets areal i styrke over tid. Det brukes til kvantifisere magnituden til AE signalet.

Fig. 4.7 viser hvordan parameterene defineres innefor en AE bølgeform.

Ut ifra de listede parameterene kan flere andre parametre også lages. **Frekvens** er et vanlig eksempel, som beregnes fra antall counts over varighet. En annen parameter som er viktig å nevne er **RA-verdien**, definert som stigningstid dividert på amplitude. RA-verdien forteller hvor kraftig amplitudegradienten på bølgefronten er, og brukes blant annet til å beskrive bruddtypen til AE kilden (Grosse og Ohtsu 2008).



Figur 4.7: Konvensjonelle treffparametre i et AE signal (Grosse og Ohtsu 2008).

4.3 Lokalisering av hyposenteret

Treff-basert parametrisering kan brukes til å beskrive bølgeformen til AE signalet ved sensoren, men som beskrevet i delkapittel 4.1.1 representerer ikke bølgeformen ved sensor kilden til signalet. Å vite hvor AE kilden er lokalisert er derfor viktig i tolkning av bølgeformen ved sensor. I tillegg gir en lokalisering av en AE kilde kunnskap om hvor det er gått brudd i materialet. Dette er en av de viktigste bruksområdene i AE tolkning, nemlig observasjon av intern mikroseismisk aktivitet fra brudd som ikke er mulig å se med egne øyne (Grosse og Ohtsu 2008).

Lokalisering av en seismisk kilde ble først utviklet i detektering av store jordskjelv, for å kunne oppdage jordskjelvetts opprinnelige kilde. Siden AE bruker samme fysiske prinsipper som jordskjelv, baserer lokalisering av AE kilder seg på de samme reglene som gjelder i jordskjelvforskning (Grosse og Ohtsu 2008).

4.3.1 Teoretisk grunnlag

Lokalisering av en seismisk kilde betegnes generelt som et *inverst problem*, det vil si at resultatet brukes til å tolke kilden (Grosse og Ohtsu 2008). En AE kilde antas å være en punktkilde, med bestemte kartesiske koordinater (x,y,z) utløst i et brudd til et bestemt tidspunkt t . Dette betyr at 4 ukjente parametre må løses for å korrekt lokalisere i AE kilde i 4

dimensjoner. For 3 dimensjoner er kun to romlige parametre (x,y) og tid nødvendig, som gir 3 ukjente parametre.

For å løse ett bestemt antall ukjente, trengs det like mange likninger (Trefethen og Bau III 1997). Likningene beskrevet videre i denne delseksjonen er tatt ut ifra MISTRAS (2011) sin manual for programvaren "AEwin software", kapittel 4. Gitt at en sensor registrerer et AE treff, kan treffet beskrives som en AE bølge med et enkel lineært forhold mellom tid og distanse. Forholdet er implisert av den primærbølgens hastighet som treffer sensor først i AE signalet.

$$d = v * t \quad (4.1)$$

Der d er distanse mellom kilde og sensor, v er primærbølgens hastighet til AE signalet i materialet, og t er tiden P-bølgen bruker. Lineariteten i distansen til likning 4.1 er ikke alltid gyldig, som forklart i delkapittel 4.1.1.

For et 2 dimensjonalt problem kan distansen d defineres som skalaren til en 2-dimensjonal vektor med start i kilde og slutt i sensor.

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2} \quad (4.2)$$

Der (x_1, y_1) er koordinatene for sensoren, og (x_s, y_s) er koordinatene til kilden (på engelsk: source). Kombinert gir likning 4.1 og 4.2 tre ukjente i en likning. De ukjente parameterene er tiden t og kildelokasjonen (x_s, y_s) .

Løsningen på problemet er å tilføre to flere sensorer til systemet. Ved å tilføre flere sensorer kan tiden bli målt relativt til det første AE treffet i en sensor i stedet for den ukjente tiden til AE kilden.

$$t_2 - t_1 = \frac{d_2 - d_1}{v} \quad (4.3)$$

Der t_2 og d_2 representerer tiden og distansen fra kilde til sensor 2. Likning 4.3 løser tidsproblemet, men har fortsatt to ukjente for en likning. Derfor tilføres en tredje sensor med samme utgangspunkt.

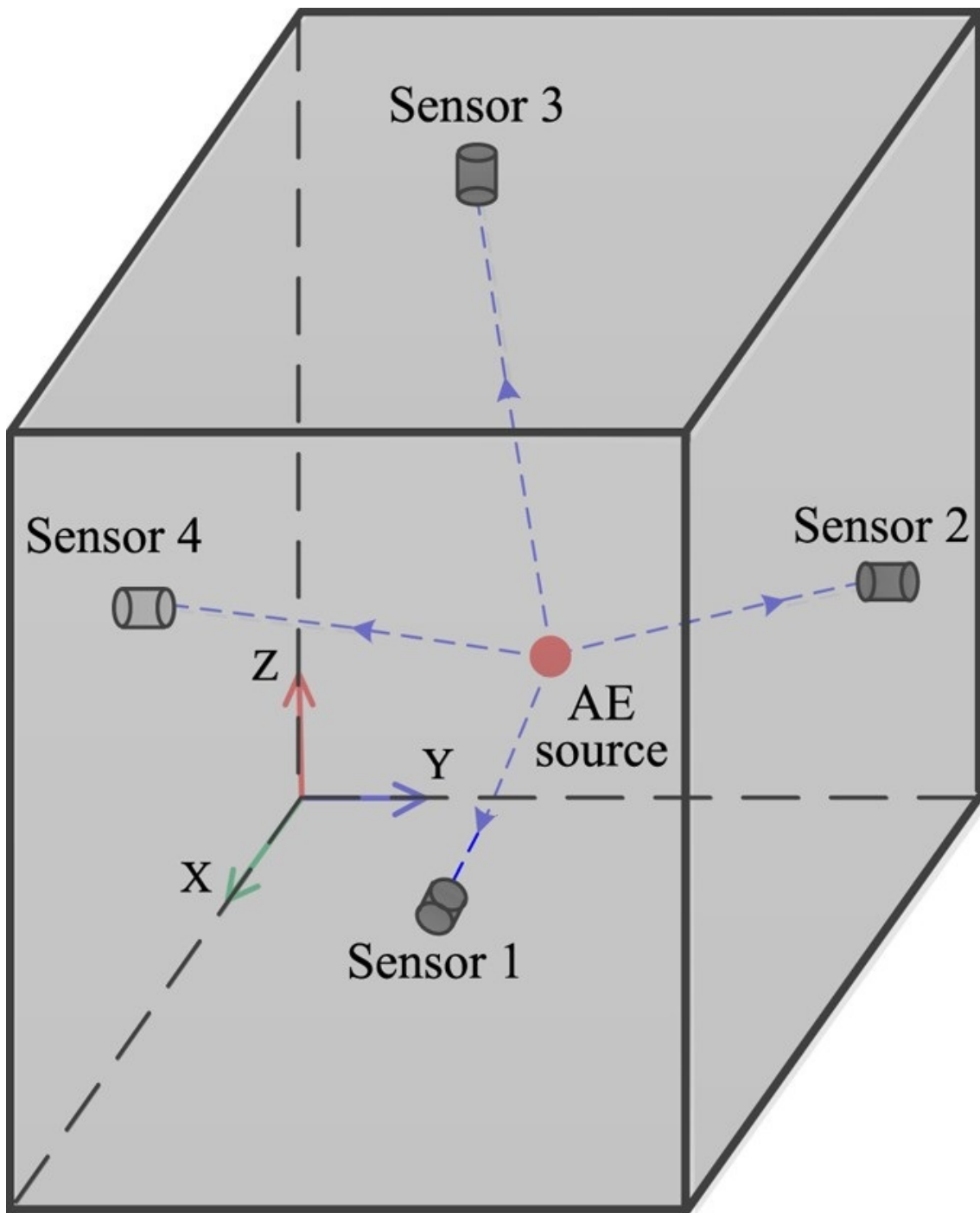
$$t_3 - t_1 = \frac{d_3 - d_1}{v} \quad (4.4)$$

Med likning 4.3 og 4.4 løses koordinatene til kilden (x_s, y_s) . Med tilbakeberegning via likning 4.2 og 4.1 kan også tiden til bruddet i AE kilden beregnes.

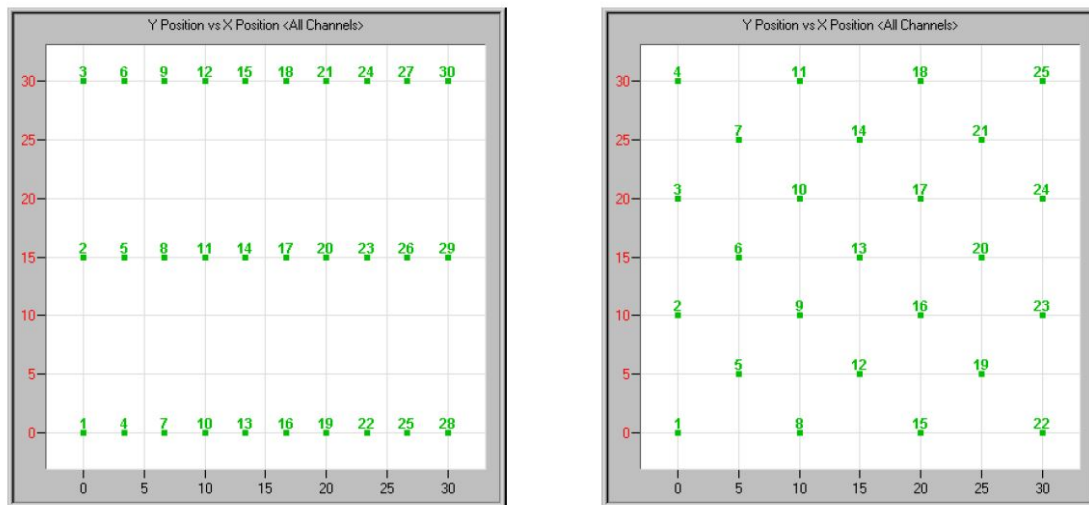
Gitt et oppsett med 3 sensorer som registrerer samme AE treff kan altså kilden til AE treftef lokaliseres i både tid og det 2 dimensjonale rommet. 3D lokalisering baserer seg på samme metodikken, men kompliseres med en ekstra romlig koordinat z . Dermed behøves

fire sensorer for å løse punktet for AE kilden, som vist i **fig. 4.8**.

Metoden beskrevet her er gyldig forutsatt at primær-bølge hastigheten i materialet er kjent og isotrop for hele materialet. Videre må lokasjonen til hver enkelt sensor være kjent (MISTRAS 2011).



Figur 4.8: Lokalisering av et AE hyposenter i et 3 dimensjonalt rom. Lokasjonen krever treff i 4 sensorer for å lage et event. Fra Zhou et al. (2017)



Figur 4.9: To eksempler på 2D modeller for akustisk emisjon med sensorplasseringer nummerert i modellen. Modellen til venstre er et eksempel på et dårlig sensoroppsett, mens modellen til høyre viser et optimalt oppsett av sensorer. Fra MISTRAS (2011).

4.3.2 Event parameteren

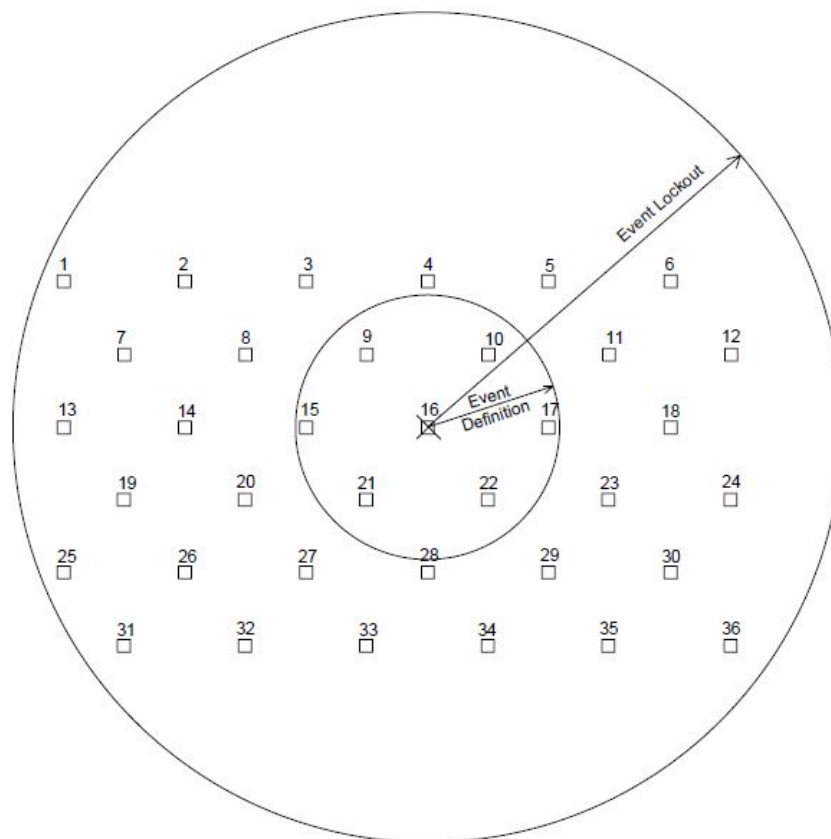
Gitt at 4 sensorer registrerer samme AE treff kan altså punktkilden til AE signalet bestemmes i 4 dimensjoner. Kilden til AE signalet blir dermed definert i tid og rom form av et AE event (på norsk: AE hendelse). AE events representerer hyposenteret der bruddet inntrerffer, og kan vises både grafisk i en 3D/2D modell og tidsmessig.

Et AE event er målt indirekte ut ifra treffparameterene, og vil dermed aldri kunne gjengi hyposenteret for bruddet perfekt hverken romlig eller tidsmessig (MISTRAS 2011). Spesielt antagelsen om et isotropt medium er sjeldent gyldig i virkeligheten.

4.3.3 Optimalisering av AE events

Som en funksjon av sensorene er et AE event bare så nøyaktig som målingene den baserer seg på. Selv om et 3D AE event kan defineres med 4 sensorer, vil en ofte ha flere sensorer for å dekke et større område. Det optimale er å spre sensorene i samme avstand fra hverandre men likevel stor nok sensortetthet til at alle AE events innenfor et område kan registreres. **Fig. 4.9** viser eksempler på god og dårlig sensorplassering innenfor et testområde.

Ofte vil det forekomme flere sensorer enn 4 som kan registrere treffet som kommer fra hyposenteret. Ved å videreføre likning 4.3 for alle sensorer som registrerer AE treffet kan optimaliseringsalgoritmer brukes digitalt til å finne det eventet som produserer minst mulig feilmargin. Kapittel 4 i MISTRAS (2011) sin manual beskriver nærmere metodikken i optimaliseringen.



Figur 4.10: Event definition value og event lockout value innenfor et 2D område med sensorplasseringer nummerert. Fra MISTRAS (2011).

Optimaliseringsprosessen krever datakraft og det er derfor ønskelig at ikke at et event ikke baserer seg på et for stort antall sensorer. Ved å bruke en **event definition value (EDV)** forhåndsbestemmes det hvilket område et event kan analyseres innenfor. I **fig. 4.10** er EDV definert slik at 7 sensorkanaler kan utgjøre et event lokalisert ved sensor 16. Dette styrker nøyaktigheten til eventet samtidig som det utelukker kanaler som ligger for langt vekk fra hyposenteret. EDV kan defineres i tid eller distanse. Begge er gyldig ettersom hastigheten i materialet er kjent.

Videre vil de resterende kanalene låses for å unngå skape nye events fra samme kilde som de innenfor EDV området. **Event lockout value (ELV)** bestemmer utbredelsen av det låste området i distanse eller tid, som vanligvis innebærer hele interesseområdet. Slik unngås det at andre kanaler danner det samme eventet som sensorene innenfor EDV området gjør. Dessuten unngås andre effekter som støy og refleksjoner av AE bølgen fra å lage falske events. Forholdet mellom EDV og ELV er illustrert i **fig. 4.10**. Både EDV og ELV betrakter sensoren der AE eventet traff først som sentrum i sitt definisjonsområde.

For å løse feilmarginer som kan oppstå når AE signalet forplanter seg i forskjellige retninger defineres en **Overcal Value** (verdi for overcalibrering **OV**). OV setter en grense for hvor hvilken avvik i distanse et event kan defineres fra, og er vanligvis betegnet som 10

% av distanseverdien til EDV. AE treffene kan dermed som et eksempel respondere med 5 % varians i hastigheter fra hendelseskilden til to ulike sensorer og likevel bli betegnet som samme event. Er forskjellen 15 % derimot, vil feilmarginen være for stor og treffene vil ikke bli kategorisert i samme event.

4.4 Bruk av akustisk emisjon til hydraulisk splitting

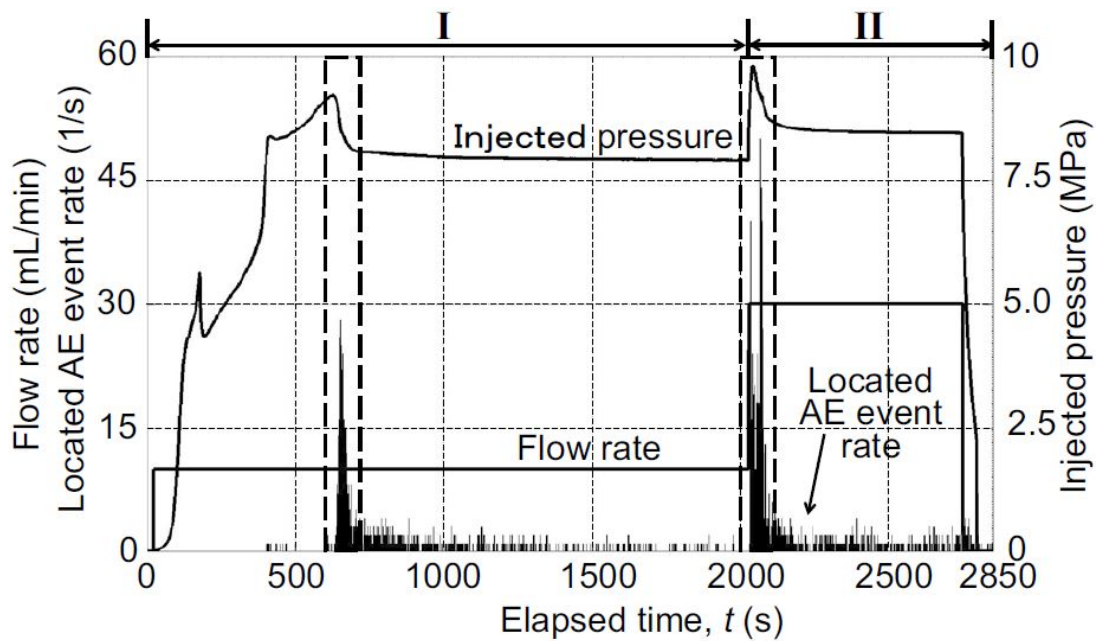
I et bergartsbrudd vil åpning og lukking av sprekk utvikles fra flere små brudd i form av kontakt mellom mineralkorn. Akustisk emisjon gjør det mulig å observere den mikroseismiske aktiviteten generert fra brudd i hydrauliske splitte og jekketester. Testing av akustisk emisjon i forsøk med hydraulisk splitting/jekking har derfor vist seg som en effektiv metode til å monitorere den hydrauliske sprekkens oppførsel. Dette gjelder både åpning, utvidelse, lukking og gjenåpning av sprekk (Ishida 2001). Tolkning av AE data kan altså brukes som et ekstra supplement i tolking av spenninger og det induerte sprekkplanet fra hydraulisk splitting og jekking.

4.4.1 Bruk av AE aktivitet i spenningstolkning

I spenningsanalysen av hydraulisk splitting og jekking er de viktigste målte trykk-parameterene, P_b , P_r og P_s , alle relatert til sprekkemekanismene i en hydraulisk sprekk (se kapittel 3). Samtidig vil aktivitet i akustisk emisjon forvente å øke i respons til lukking eller åpning av sprekk. Hyppighet i AE aktivitet over tid kan dermed korreleres med trykk-parameterene grafisk (Ishida 2001).

AE aktiviteten kan defineres som hyppigheten av hyposentre som skapes av sprekkoppførselen. Å sette et tall på AE aktiviteten er utfordrende, siden en må ta hensyn til både hyppigheten av hyposentre og styrken i hver enkelt hyposenter. Event raten er mest brukt i nyere tid til å kvantifisere AE aktiviteten (Ishida et al. 2019), siden events er direkte relatert til hyposenterene. **Fig. 4.11** viser et eksempel på bruk av event rate over tid, der event raten er plottet i samme tidsakse som trykk og flowrate. Event raten øker i takt med den mikroseismiske aktiviteten, som er størst under åpning og lukking.

En eldre variant å måle AE aktiviteten på er å bruke teller parameteren fra de treff-baserte dataene i en **count rate** (på norsk: tellerrate). Count raten tar hensyn til treffene som registreres og treffenes styrke i form antall amplituder i treffet som overgår terskelspenningen (se delkapittel 4.2). En count rate vil dermed være sensitiv over antall treff fra hyposentre i bruddutviklingen og styrken til hyposenterene. Count rate har likevel en stor svakhet i at den ikke skiller ut støy på lik linje med event raten, og er sensitiv til bevegelser utenfor testområdet. Dessuten representerer counts AE aktiviteten ved sensorene, ikke selve hyposenteret. Nivået i terskelspenningen til AE signalet er her svært viktig i å skille ut støy, men samtidig inkludere flest mulig reelle treff. Et grafisk plott av count rate inkludert i trykkmålingene er vist i **fig. 4.12** fra Ishida (2001). Figuren viser en nær sammenheng mellom tolket P_r og P_s fra trykkmålingene, og AE count raten. Forskjellen i trykkurve-tolket P_s og AE tolket P_s er her kun $0.2MPa$.



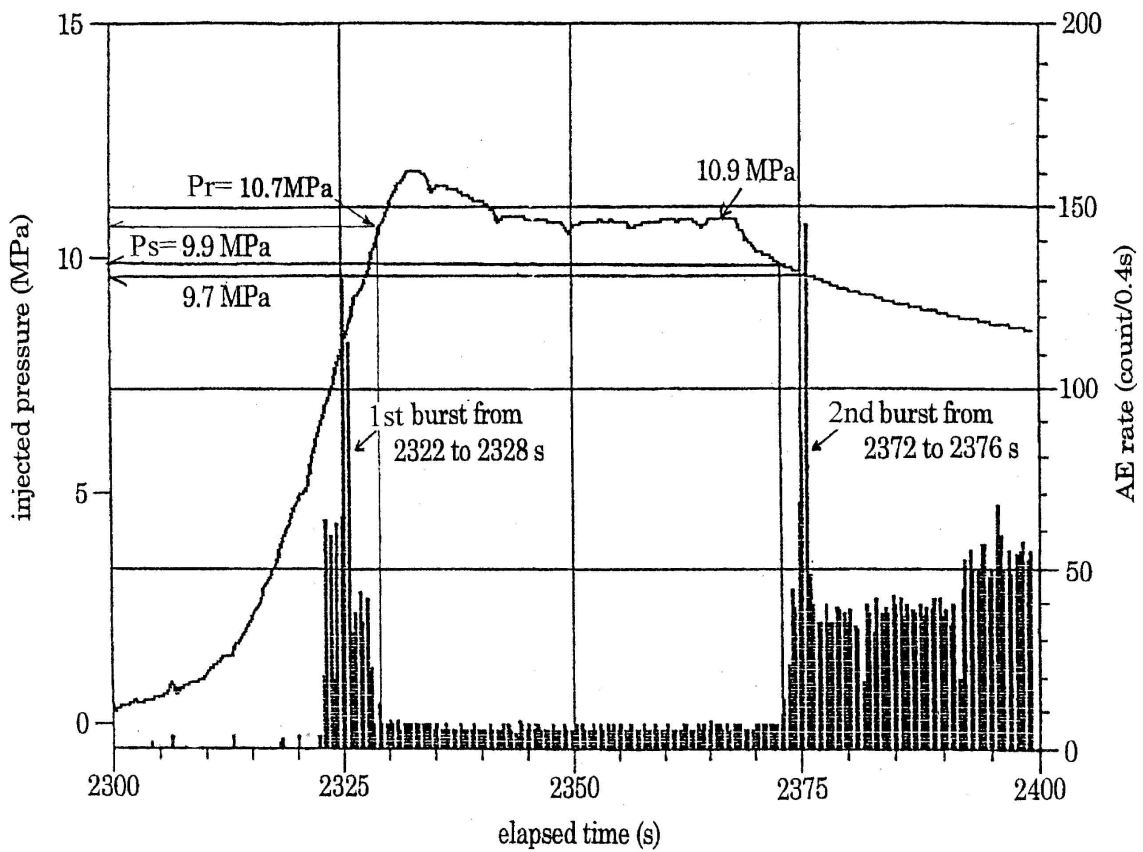
Figur 4.11: AE event rate og trykk respons til hydraulisk splitting med forskjellige flowrater. Fra Ishida et al. (2019)

AE aktivitet kan og vises grafisk som en kumulativ funksjon istedet for en ratefunksjon. Med et kumulativt plott er det enkelt å detektere under hvilke tidsintervall mikroseismisk aktivitet i hovedsak inntreffer.

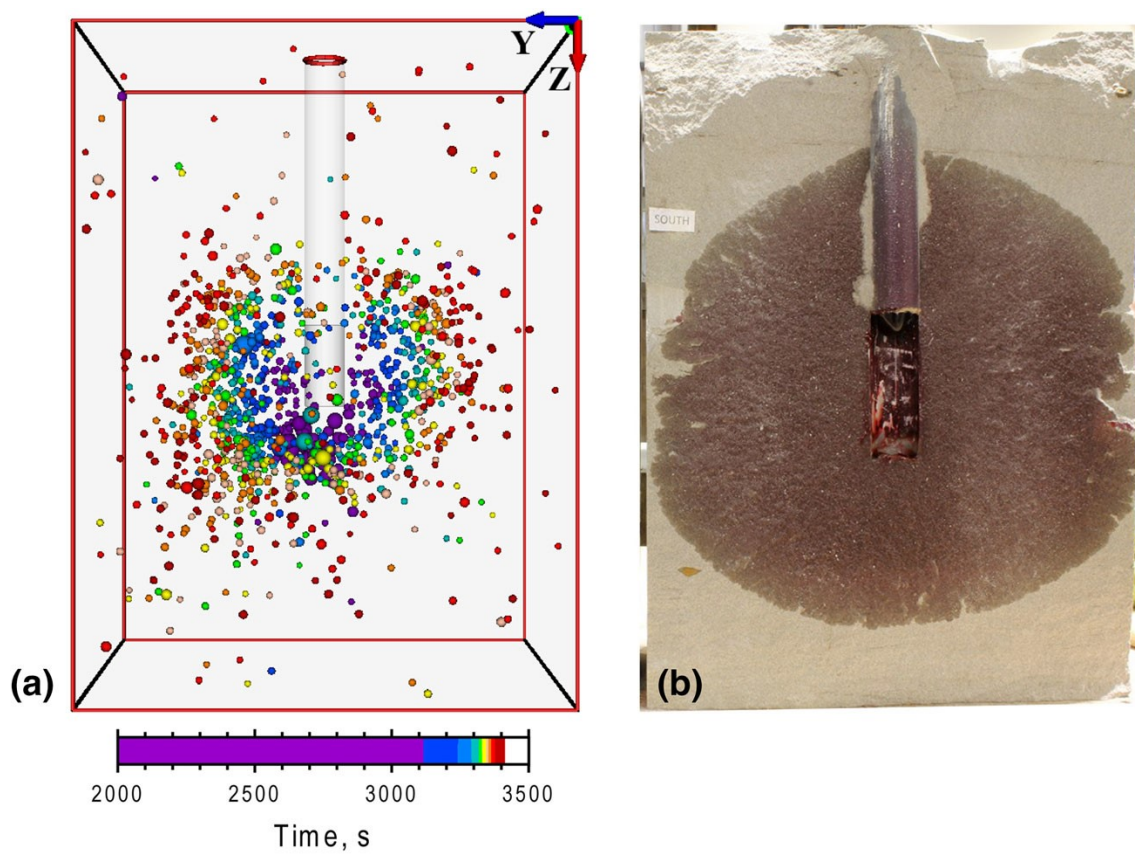
4.4.2 Detektering av sprekkeplan

Når et sprekkeplan åpnes eller lukkes vil den mikroseismiske aktiviteten som frigjøres produsere en punktsky av hyposenterer (Damani et al. 2018). Gjennom bruk av programvare som kan regne ut event-parameteren, kan disse hyposenterene visualiseres i et 3D eller 2D plot. En sammenstilling av alle events under en hydraulisk splitte/jekketest vil dermed gjengi sprekkeplanet i form av en punktsky med hyposenter. Dette kan gjøre det mulig å oppdage sprekkeplan som ellers ikke kan observeres med andre metoder, eller bekrefte allerede antatte sprekkeplan.

Siden event-parameteren inneholder også tidspunktet for AE hendelsen benyttes ofte et fargeplott i punktskyen for å sammenlikne når i plottet de ulike hendelsene i punktskyen inntreffer. Dette gir informasjon om sprekkeplanets forplantning i tid (Stanchits et al. 2014). En fullstendig testsyklus kan og deles opp i mindre tidsbestemte deler for å analysere spesifikke deler av testsyklusen. **Fig. 4.13** viser en punktsky av AE events i et tverrsnitt sammenliknet med det observerte sprekkeplanet. De ulike punktene er inntegnet i ulike farger for å illustrere tidspunktet for hver enkelt event.



Figur 4.12: AE count rate og trykk av hydraulisk jekking over tid. Testen følger shut-in prosedyren i sprekkeluknings-fasen. Tolket trykk P_r og P_s er illustrert. Fra Ishida (2001).



Figur 4.13: Tversnitt av en AE event punktsky i figur **a** sammenliknet med faktisk tversnitt av hydraulisk splittet sprekk i figur **b**. Fargevariasjonen i punktsky-plottet viser forplantingen av sprekkplanet over tid. Fra Stanchits et al. (2014)

Kapittel 5

Laboratorie

Det er utført omfattende laboratorieforsøk i hydraulisk splitting- og jekking av steinprøver. Laboratorieforsøkene presentert med data i denne oppgaven er fra tidsrommet 03.02.2020 - 29.04.2020. Laboratorieforsøkene er utført i ingeniørgeologisk og bergmekanisk laboratorium ved NTNU i Trondheim. En risikoanalyse for laboratoriearbeidet ble utredet og godkjent før påbegynnelse av labarbeid. HMS opplæring med labansvarlig Gunnar Vistnes ble gjennomført før oppstart.

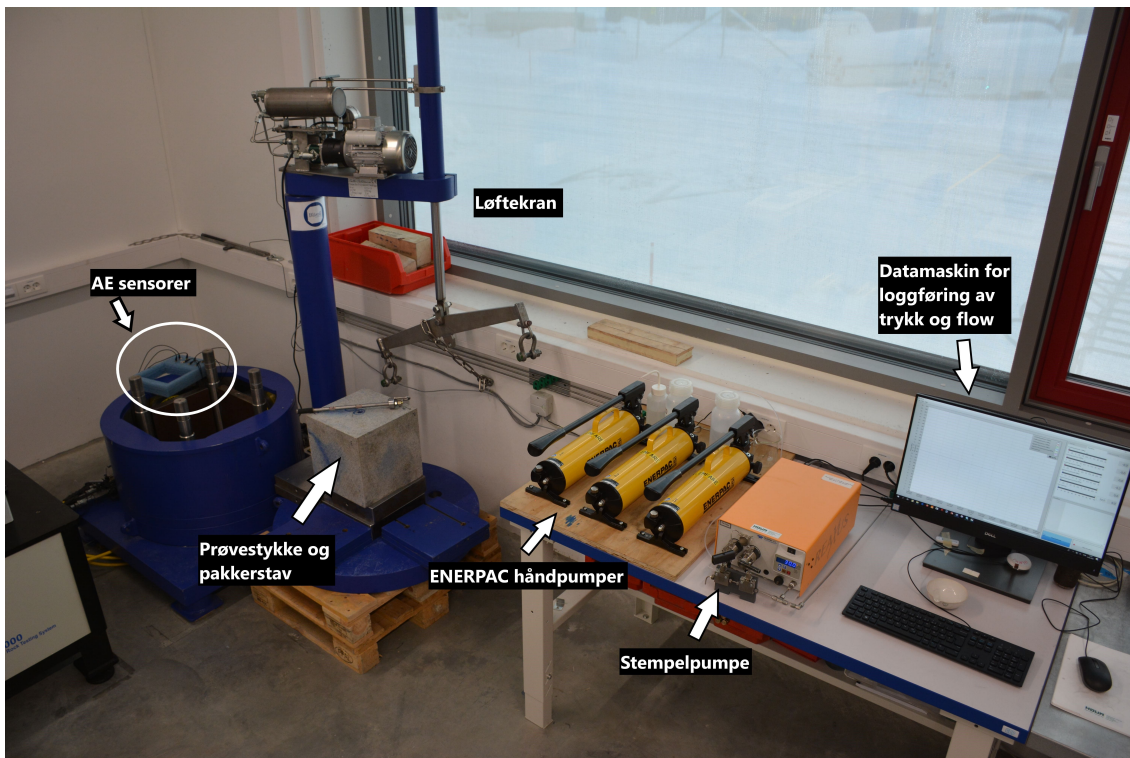
I dette kapittelet vil det fysiske oppsettet for hydraulisk splitte/jekkeforsøk i laboratorie bli gjennomgått. Forskjeller i laboratorieforsøkets oppsett fra vanlig ISRM standard vil bli beskrevet. Videre vil riggingen av programvaren brukt til akustisk emisjonsmåling, AEWIN software, bli forklart. For beskrivelse av tester og resultat, se kapittel 6.

5.1 Oppsett av hydraulisk splitte/jekkeforsøk

Oppsettet for laboratorieforsøkene er en polyaksiell testtrigg designet av Henki Ødegaard og produsert på vegne av NTNU. Testtriggen er designet for bergartsprøver dimensjonert kubisk i størrelsen $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. Et fullstendig bilde av testtriggområdet er vist i **fig. 5.1**. Testtriggen inneholder 4 hovedkomponenter som tilsammen utgjør datagrunnlaget for forsøkene. De 4 komponentene er nevnt følgende.

- 3 ENERPAC stempler i testtriggens 3 dimensjoner
- Injeksjonslinje med pumpe
- 1 Pakkerstav
- 8 AE sensorer i kontakt med prøve

Testtriggens hensikt er å gjenskape hydraulisk splitting og jekking slik det foregår i felt, under kontrollerte omgivelser.



Figur 5.1: Overblikk av oppsettet til testtriggen. Etter Henki Ø.

5.1.1 Spenningsstempler

For å gjenskape feltsituasjoner av spenningsforhold i laboratorie er det innført 3 ENERPAC håndpumper kombinert med sylindrestempler. Håndpumpene er koblet til sylindrestemplerne i en hydraulikklinje, som gir et lukket trykksystem. Pumping av håndpumpene vil dermed utvide sylindrene, som da enten utvider seg i volum eller bygger opp et trykk ut ifra om sylindren er låst fast eller ikke. I testtriggen er de 3 hydraulikklinjene separate fra hverandre, representerer dermed en trykklinjje hver. Trykklinjene er koblet opp mot en datamaskin som punktprøver trykket i hver linje hvert millisekund (1000 Hertz). Bilde av håndpumpene finnes i vedlegg **F.1**.

Sylindrestemplerne er plassert internt i testtriggen for oppnå spenningskontakt med bergartsprøven. To stålplater plasseres mellom stempelsylinder og bergartprøve for å unngå ujevne spenningsforhold og skade på stempel. De 3 stemplene er fikset 90 grader på hverandre for å gjenskape et hovedspenningsfelt. Spenningsfeltet er inndelt i tre hovedretninger. Ett stempel er plassert i Nord-Sør retning, ett stempel i Øst-Vest retning og ett stempel i vertikal retning. Dermed er to virtuelle horisontalspenninger og en vertikalspenning representert i laboratorieforsøket.

5.1.2 Steinprøver

Totalt 4 bergartsprøver benyttet i laboratorieforsøkene. Bergartsprøvene er av type Iddefjordgranitt, som ble bestilt på forhånd av Henki Ødegaard. Iddefjordsgranitten er en plutonsk bergart med homogen krystallstruktur (Bryhni og Askheim 2020). Den homogene krystallstrukturen gjør bergarten egnet i laboratorieforsøk, ettersom anisotrope effekter dermed forventes å opptre sjeldent i testresultatet. Lydhastigheten for prøvene er målt av Henki Ødegaard (se vedlegg C). Alle bergartsprøvene antas å ha en strekkstyrke på 10 MPa.

Alle bergartsprøvene har samme type form, $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ kube. Den kubiske formen tilsier at hovedspennings-aksene fra stemplene kan direkte oversettes til testprøven. Hver kvadratisk overflate i bergartskubene er inntegnet med en himmelretning for å kunne referere prøven i et bestemt koordinatsystem. De vertikale overflatene er inntegnet "west" (vest), "east" (øst), "south" (sør) og "north" (nord). De horisontale overflatene er betegnet "top" (topp) og "bottom" (bunn). Identiteten til bergartsprøvene er inntegnet i et ID nummer på "top" overflaten. Inntegningen av himmelretninger er viktig for gjenbruk av prøvestykker i forsøkene og i 3D formateringen av prøvebilder.

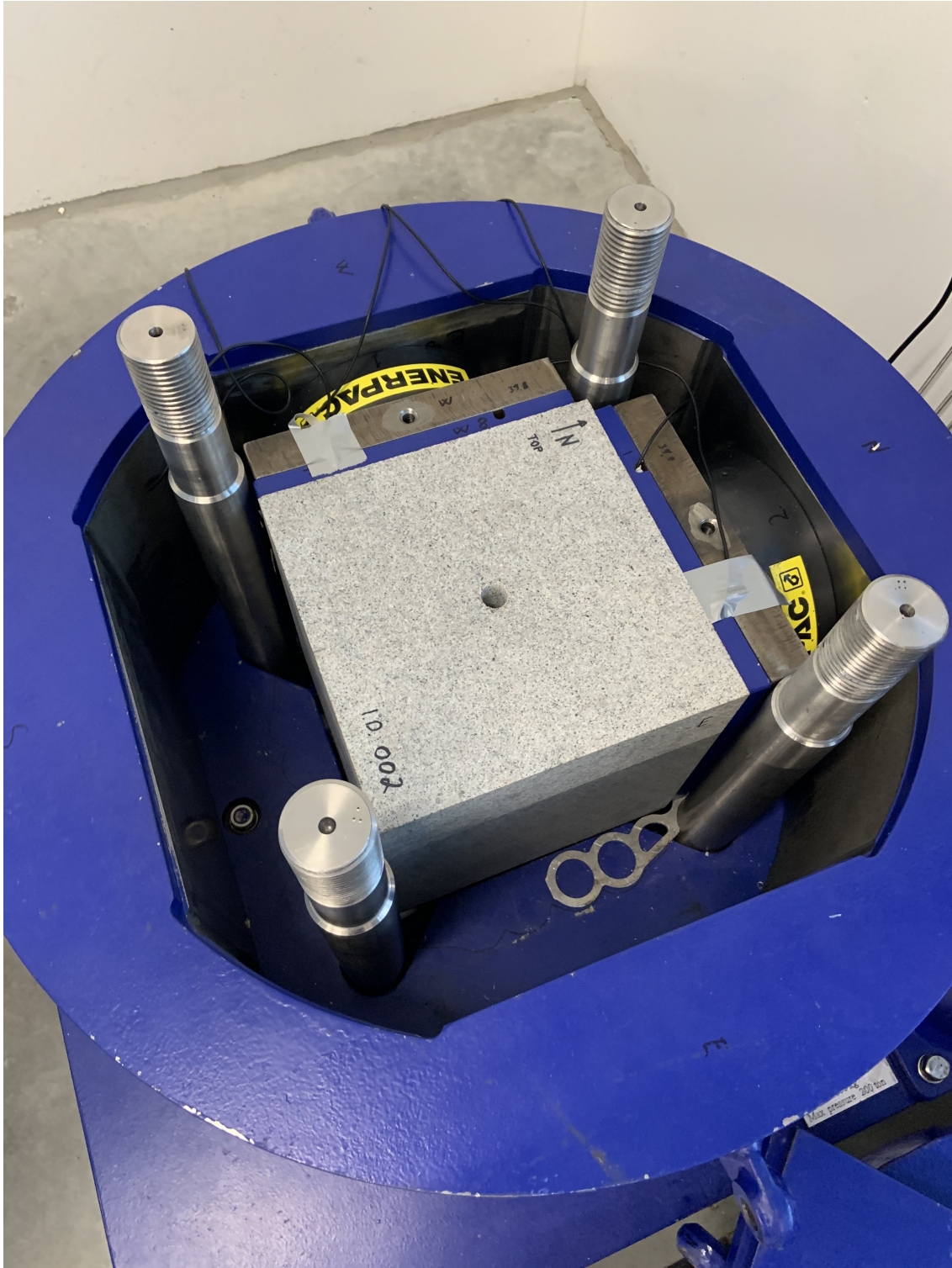
På "top" overflaten i hver bergartsprøve er det boret et 20 mm bredt borhull i overflatens midtpunkt. Borhullet har en dybde på 15 cm, slik at bunnen av borhullene tilsvarer bergartsprøvene sitt volumetriske sentrum. Boringen av borhullene ble utført av Henki Ødegaard. Hensikten med borhullet er å skape plass for pakkerstaven som brukes til injisering av vann i bergartsprøven. Borhullene har en sylindrisk form

Fig 5.2 viser bergartsprøve I.D.002 montert i testtrigg før forsøk. "Top" overflaten er inntegnet med nordpil i figuren. Spenningsstemplene er her i kontakt med prøvestykket via stålplater. Borhullet kan ses på toppen av prøvestykket. Stempelet for vertikalspenning er plassert under prøvestykket.

5.1.3 Pakkerstav

For en fullstendig oversikt over injeksjons- og AE komponenter i laboratorie-oppsettet, se **fig. 5.3**.

I bergartsprøvens borhull plasseres en pakkerstav under testing. Pakkerstavens funksjon er å isolere borhullets injeksjonsområde for trykksetting av vann. En pakkerstav består av en pakker og en injeksjonsstav. Injeksjonsstaven består av et indre og ytre stålår med vannutgang i begge ender. Den ene vannutgangen er tilknyttet injeksjonslinje, mens den andre utgangen er tilment injeksjonsområdet i bergartsprøven. Pakkeren brukt i forsøkene er av type mekanisk pakker (NFF 2010). Den er plassert utpå den indre stålåret nederst på pakkerstaven. Den mekaniske pakkeren består av en gummihylse som kan strammes inn og trekkes tilbake til original form. Pakkeren kan dermed brukes flere ganger. I kobling med injeksjonsstaven strammes pakkeren inn ved å skru ytterst på injeksjonsstaven. Dermed låses pakkeren til borveggen som hindrer lekkasje av vann ut borhullet. Et fullstendig bilde av pakkerstaven er vist i vedlegg **F.2**.



Figur 5.2: Steinprøve montert i blåstål med stempler merket ENERPAC. Nordlig retning i prøvestykket er vendt mot stempel 2 vist til høyre i bildet. Stempel 1 er plassert i vest-øst retning i øvre del av bildet.

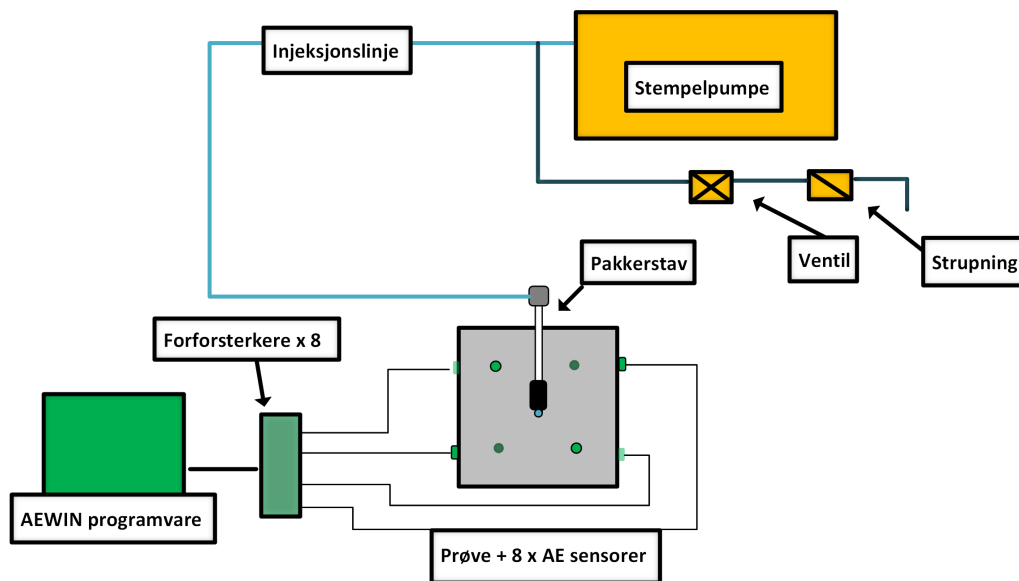
Pakkens mekaniske løsning gjør den enkel å bruke og er en billig løsning i praktisk berginjeksjon (NFF 2002). Det er viktig å merke seg at løsningen avviker fra ISRM standard, som benytter to hydrauliske pakker (Haimson og Cornet 2003). Pakkerstaven benyttet i laboratorie er i realiteten en miniatyr versjon av pakkerstaven brukt for forenklete jekketester. Dermed representerer laboratorieforsøkene tester med forenklet jekking og ikke testing i henhold til ISRM prosedyre.

5.1.4 Injeksjonslinje og Injeksjonspumpe

Pakkerstaven er koblet opp mot en injeksjonslinje til forsøkets pumpesystem (se vedlegg **F.3**). Injeksjonslinjen inneholder et tynt transportrør i rustfritt stål designet for å tåle stort trykk og transportere vann kjapt fra pumpe til prøve. En trykkmåler er installert i injeksjonslinjen nært inngangen til pakkerstaven. Trykkmålerens hensikt er å måle in situ injeksjonstrykket under testforsøk. Ved å plassere måleren nærme pakkerstaven minimeres friksjonstapet i trykkmålingene. Injeksjonslinjen er vist i **fig. 5.3**.

Injeksjonspumpen bestemmer flowraten av vann som tilføres bergartsprøven. Den er av en type hydraulisk dobbeltvirkende stempelpumpe, som er den vanligste injeksjonspumpen benyttet i berginjeksjon (NFF 2002). Pumpen er i stand til å lage en pumperate av vann mellom 0.01 ml/min og 300 ml/min. Under trykk er maksimal pumperate på 100 ml/min opptil 400 bar. Vedlegg **B** viser produktbladet av stempelpumpen benyttet i forsøkene. Vannet som brukes er destillert i en plastflaske, koblet med plastrør til stempelpumpe (se vedlegg **F.4**).

Injeksjonspumpen er koblet til to utganger. Den ene utgangen er injeksjonslinjen til prøvestykket. Den andre utgangen fører vannet ut til atmosfæren via en ventil og en strupning. Ventilen brukes til å åpne og lukke strømming av vann ut av injeksjonslinjen til. Den andre kranen er betegnet som en strupning. Strupningen begrenser vannuttaket i ventilen til en forhånds-kalibrert trykkonstant. Strupningen er benyttet under flowback-forsøkene (se delkapittel 3.6). For shut-in tester og stegvis jekking er strupningen åpen og kun ventil bestemmer vannuttak. Inndelingen i ventilkraner og rørutgang fra stempelpumpe er illustrert i **fig. 5.3**. Vedlegg **F.5** viser et nærbilde av strupning og ventil med stempelpumpen i bakgrunnen.



Figur 5.3: Oppsett av injeksjonspumpe og akustisk emisjon mot steinprøve. En pakkerstav settes inn i prøven og kobles til pumpesystemet. AE sensorer monitorer mikroseismisk aktivitet. Tegnet i Smartdraw.

5.2 Oppsett for akustiske emisjonsmålinger

Totalt 8 sensorer for registrering av akustisk emisjon er koblet til prøvestykkene under forsøk. For databehandling av AE signal er programvaren AEWIN software benyttet. Oppsettet av programvaren ble gjort med henhold til AEWIN sin brukermanual (MISTRAS 2011). Bilde av datamaskinen benyttet i måling av AE er vist i vedlegg F.6.

5.2.1 Sensorer i testrigg

Hovedmålet med design av sensorplassering er å best mulig registrere mikroseismisk aktivitet i bergartsprøven med et minimalt støynivå. For å gjennomføre dette er hver sensor plassert med formål å være i direkte kontakt med prøven.

2 sensorer er plassert i hver vertikal blåstålplate i testriggen. I samhold med steinprøvens koordinatsystem gir dette to sensorer i hver himmelretning. Sensorene er nummerert fra 1 til 8, der 1 og 2 er plassert i nordlig plate, 3 og 4 i østlig plate, 5 og 6 i sørlig plate og 7 og 8 i vestlig plate. I vedlegg F.7 og F.8 vises den østlige blåstålplaten med henholdsvis framside og bakside. Ingen sensorer er plassert i de to vertikale blåstålplatene. For optimal sensorplassering er sensorene plassert med samme avstand fra hverandre for best mulig dekning av prøvestykket.

For å få plass til sensorene i i stålplatene er hull og ledningrom i blåstålplatene laget på forhånd. For å unngå støy fra stålplatene i sensorer separeres de med en gummihylse. Kontakt med bergartprøve er så forsterket med ekstra gummi i sensoren bakdel for trykk

mot prøve, samt ultralydgele som gir direkte kontakt mellom sensor og prøvestykke. Bilde av sensor med gummihylse er vist i vedlegg **F.9**. Vedlegg **F.10** viser sensor koblet på blåstålplate før testgjennomføring.

5.2.2 Representasjon av AE data i AEWIN

Programvaren AEWIN er i stand til å registrere AE kilder i tid og rom, med bruk av event parameteren beskrevet i delkapittel 4.3. En romlig modell av bergartsprøvene må forhåndsdefineres for å kalibrere event parameteren.

For å få til dette er sensorene definert i å tilhøre en felles *channelgroup*, kanalgruppe på norsk. Ordet ”channel” referes her til hver enkelt AE sensor. Videre ble et koordinatsystem for testområdet definert. Koordinatsystemet fulgte kartesiske koordinater med enhet i millimeter. Hver lengde x,y og z har en lengde fra 0 til 300 millimeter i samsvar med dimensjonene til bergartsprøvene. X-retning representerer her vest-øst, Z-retningen representerer nord-sør, mens Y-retning representerer vertikalen. Origo i koordinatsystemet er tilegnet det nordvestlige hjørne plassert i bunn. Koordinatene definerer en kubisk modell som representerer bergartsprøven. Hver enkel sensor plasseres så innenfor koordinatsystemet i programvaren. Dermed tilegnes sensorene en kjent koordinat i rommet, som er vesentlig i beregning av AE events (se kapittel 4). Sensorplasseringene i den kubiske modellen er vist i **fig. 5.4**

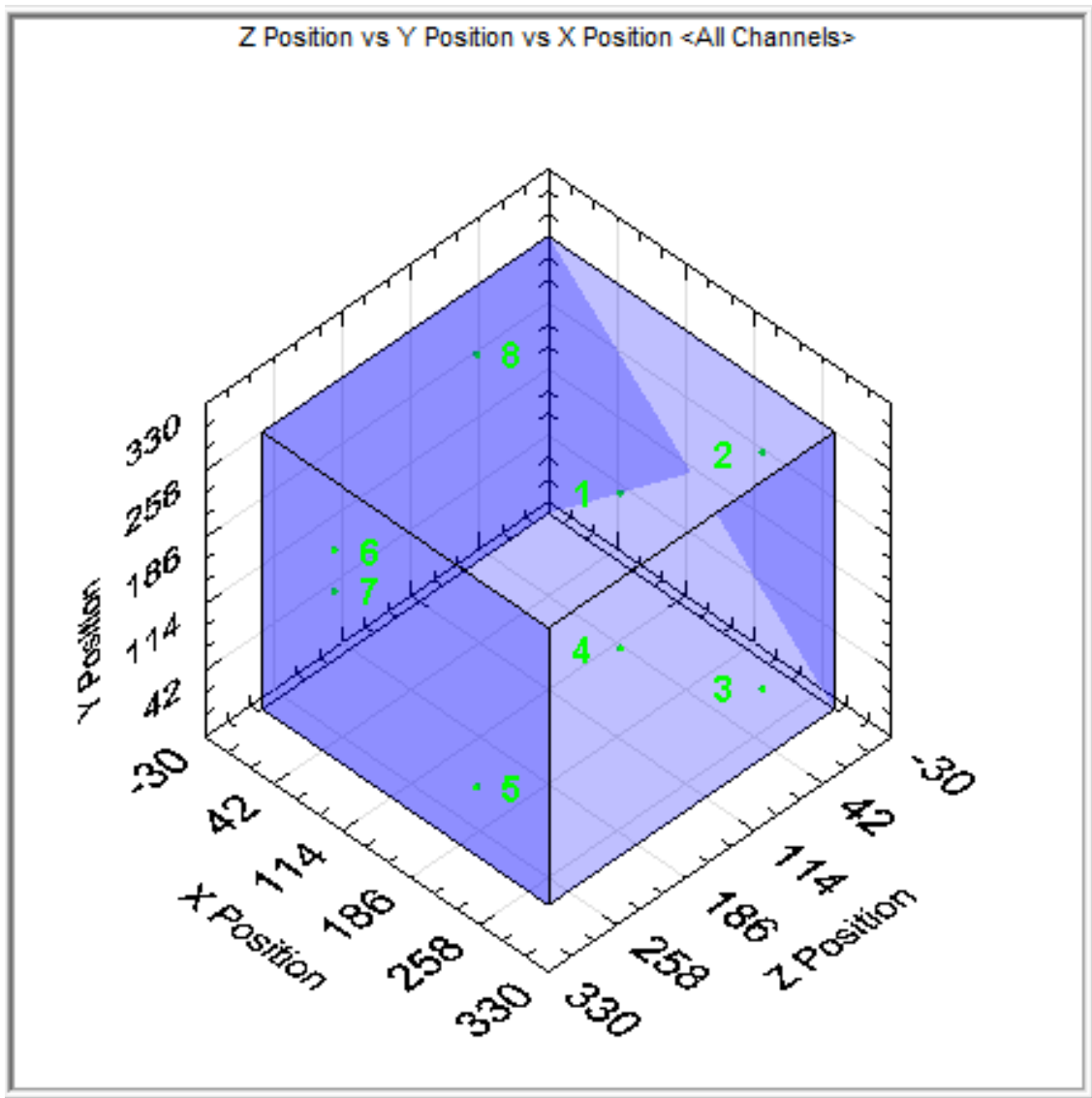
Videre er koordinatsystemet med sensorplassering brukt som utgangspunkt for 2D og 3D visualisering av event-data. Det er laget totalt ett 3D plott og fire 2D plott for visualisering av events. 3D plottet representerer hele prøveområdet, mens 2D plottene representerer 4 ulike tversnitt av prøven. 3D plottet er vist i vedlegg **E**, mens 2D plottene er vist i vedlegg **D**. 2D plottene er kategorisert i fire ulike perspektiver.

- North view (sett fra nord)
- Top view (sett fra fugleperspektiv)
- Looking west (sett mot vest)
- Looking east (sett mot øst)

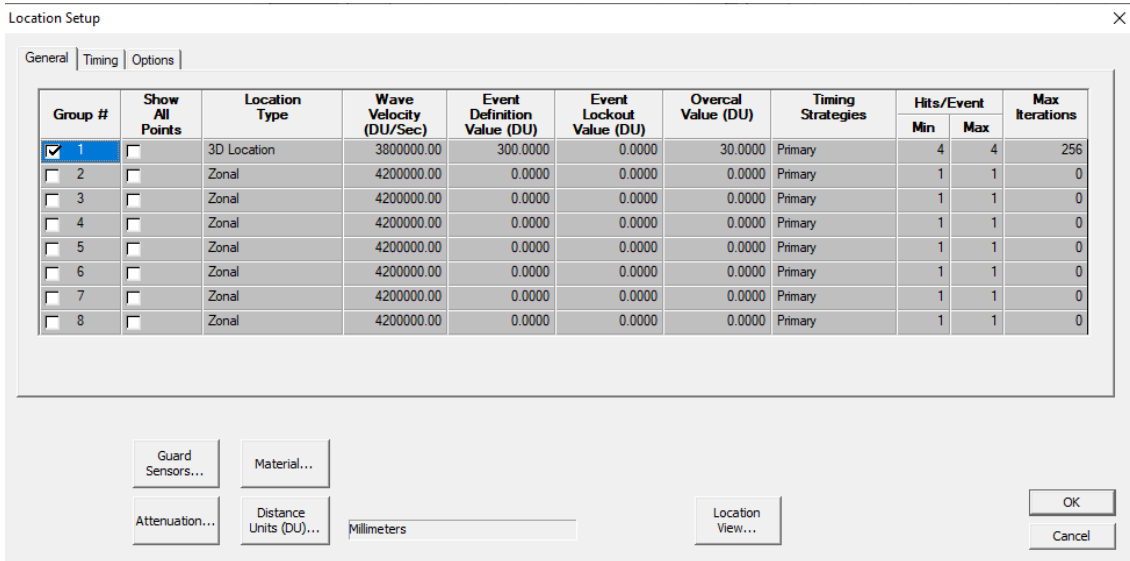
5.2.3 Signalbehandling

For teori bak signalbehandling, se delkapittel 4.2. Forforsterkere er installert for alle sensorer med 40 desibel amplitude. Bilde av forforsterkere er vist i vedlegg **F.11**. Videre er maskinvaren kalibrert til å ta inn ønskede AE signal. Oppsettet for signalbehandling er vist i **figur. 5.5**, gruppe 1.

Primærbølgehastigheten i materialet er satt til 38000000 DU/sec. *DU* er en forkortelse for *distance units*, og er et mål på lengde i millimeter. *Sec* står for sekund. Hastigheten er bestemt ut ifra en gjennomsnittlig P-bølge måling av bergartsprøven ID.001. Videre



Figur 5.4: Prøveområdet i blått definert i et 3 dimensjonalt koordinatsystem. Sensorene er markert med nummer i grønn farge.



Figur 5.5: Oppsett av lokasjonsparametre for bestemmelse av event-data. "Group 1" er benyttet i forsøkene.

er event definition value (EDV) bestemt til 300 millimeter. Det tilsvarer lengdeskalaen til prøvestykkene, og sørger for at alle sensorer kan registrere samme treff i samme event. Event lockout value er satt til null fordi ingen sensorer eksisterer utenfor området for event definition value. Overcal value er satt til 30 millimeter som er 10% av EDV, standarden for laboratorietester (MISTRAS 2011). Et event er definert som 4 treff (hits), og 256 iterasjoner er maksimalgrensen for optimalseringen av events.

5.3 Testprosedyre

Under laboratorieforsøkene ble det laget en fast prosedyre for hver testgjennomføring. Dette delkapittelet forklarer hovedtrekkene i prosedyren, samt feilkildene som kan oppstå under oppsett.

5.3.1 Montering av prøve og sensorer

Første del av prosedyren innebærer i å korrekt plassere bergartsprøven i testtriggen. ENERPAC-stemplene blir først presset inn for å gi plass til stålplater og prøve. Deretter plasseres stålplater med sensorer på ”vestlig” og ”nordlig” side. Dermed skapes et hjørne i nordvest som bergartsprøven kan plasseres direkte i uten å justere på prøven senere. Ultralydgele festes på sensorene.

Videre bli bergartsprøven løftet opp med en hydraulisk løftekrane og ført inn i testtriggen. Med fokus på det nordvestlige hjørne blir prøven satt ned. **Fig. 5.2** viser hvordan testtriggen ser ut på dette tidspunktet. De resterende stålplatene og AE sensorene blir så plassert på, med ultralydgele i sensorenes overflate. Stålplaten på toppen av prøven settes på. Til slutt blir de horisontale spenningsplatene satt opp til 1 MPa hver for å få optimal kontakt mellom stålplater og prøvestykke. Spenningsnivået overvåkes i PC-skjermen. **Figur 5.6** viser testtriggen etter at alle stålplater er satt på prøven.

Videre brukes en ”pencil lead break test” for å sjekke at alle sensorer er aktive og i kontakt med prøve. En vanlig trykkblyant knekkes her på steinblokkens overflate mens AE treff i sensorene overvåkes aktivt på datamaskin. I histogrammet ”hits vs channel” på AEWIN programvaren vises treffresponsen (hits) for hver sensor (channel). Histogram-typen er vist i **figur. 5.7**. Gir knekket i blyanten på prøve respons i alle sensorer på diagrammet, tilsier det en god kontakt mellom AE sensorer og prøvestykke.

Borhullet fylles så halveis opp med vann for å vannmette borhullets nederste del. Prøvelokket settes på med kran og låses igjen. Både prøvelokket og den topplasten på prøven er designet med et sentralt hull for å gi fortsatt tilgang til borhullet i prøvestykket. Prøven er nå fullstendig omsluttet og klar for videre prosedyre

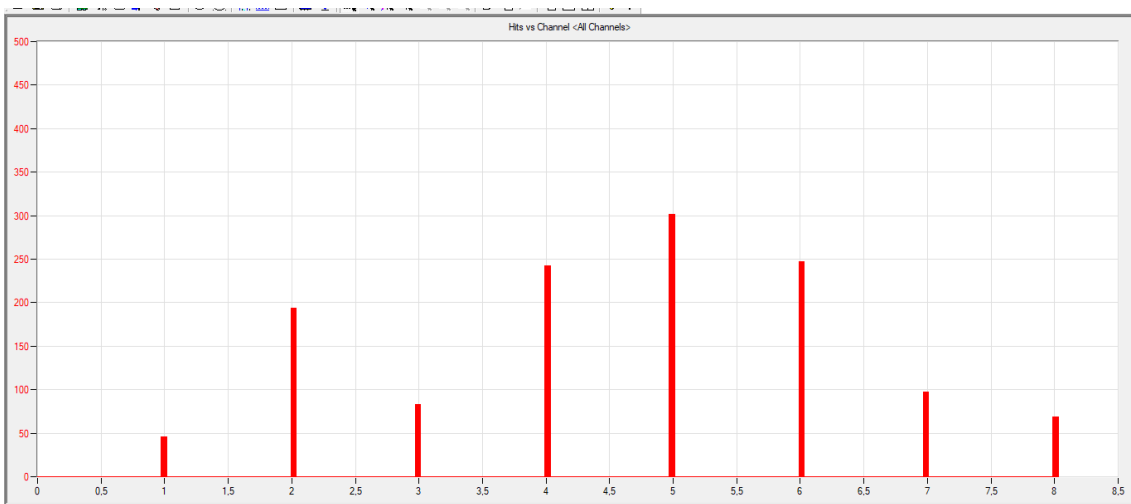
5.3.2 Klargjøring til testgjennomføring

Horisontalspenningen åpnes nå opp igjen for å lette på trykket i borhullet. Pakkerstav monteres og settes ned i borhullet, der gummipakken strammes inn for å fastsette pakken til borveggen.

Injeksjonlinjen skal så kobles på pakkerstaven. Før dette gjennomføres flommes injeksjonlinjen med vann fra stempelpumpen for å fjerne eventuelle luftrom som kan opptre inne i linjen. Dermed er vannet i linjens ende i kontakt med vannet fra stempelpumpen. Videre fylles også pakkerstav opp med vann til toppen av røret. Dermed er alle deler fra



Figur 5.6: Testtrigg med alle stålplater på prøvestykke. Løkk er enda ikke satt på.



Figur 5.7: Treff (hits) mot sensorer i en AE måling.

stempelpumpe til borhull fylt opp med vann, og injeksjonslinje kobles på pakkerstav. Vedlegg **F.3** viser koblingen mellom pakkerstav og injeksjonslinje. Pakkerstaven festes kobles og til løftekranen som en ekstra sikring i tilfelle pakkeren løsner ut under høyt vanntrykk.

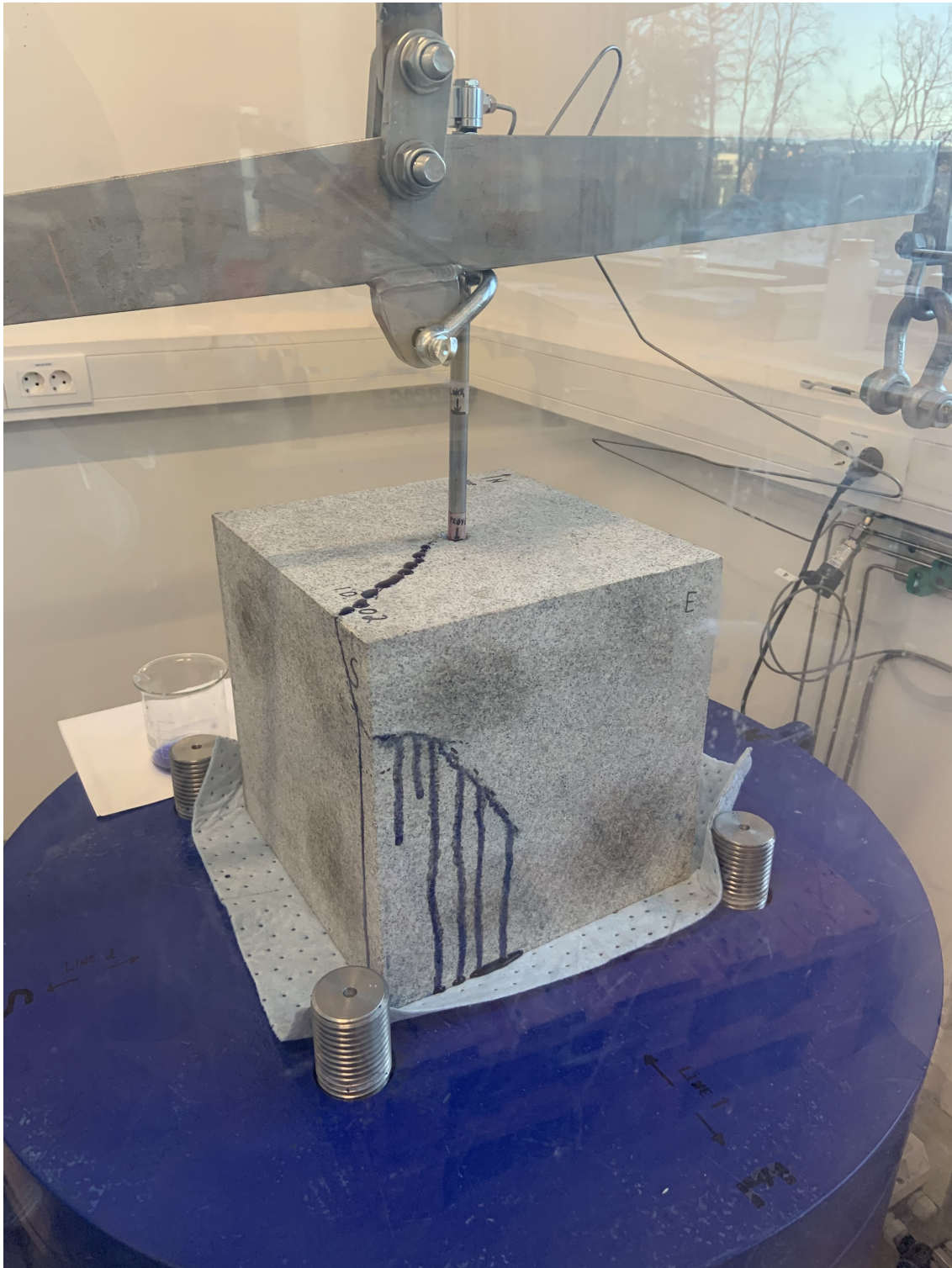
Prøven trykkeses så til initielle spenningsverdier. Som en hovedregel trykkeses mellomste hovedspenning først, deretter minste og største hovedspenning samtidig. Dette skaper minst mulig friksjon mellom stålplater og prøve, som er viktig for å unngå skjærspenninger i prøvestykket.

Med dette er prosedyren for oppsett av prøve gjennomført og testing kan begynne. AEWIN programvaren starter loggføringen og sender et startsignal til loggføringen for trykk og pumpe. Dermed er referansetiden til testen lik for både AE, trykk og pumpe. Testingen følger så prosedyren for enten shut-in, flowback eller stegvis jekketesting. Disse metodene er beskrevet nærmere i kapittel 3.

5.3.3 Flømming av prøve

Etter testgjennomføring demonteres testtriggen og prøvestykket blir tatt ut. Loggførte data lagres etter testnumrene for laboratorieforsøkene.

For å påvise nye splittede sprekker i en bergartprøve er injeksjon av vann med metyl-blå farge utført etter demontering av prøve. Dette blir kalt for flømming av prøve. Prøven av interesse er her plassert på lokket i testtriggen og koblet til med pakkerstav og injeksjonslinje. Deretter pumpes det fargede vannet inn i prøven til vannlekkasje synes i prøvens overflate. Et eksempel på flømming av prøve er vist i **fig. 5.8**. Den metyl-blå fargen markerer dermed induerte sprekker i prøvens overflate og henger igjen etter uttørking. Fargeleggingen bidrar til tydeliggjøring av sprekk som gjør visualisering og måling av sprekk enklere.



Figur 5.8: Flømming av sprekk i prøve ID.002.

Kapittel 6

Laboratorieresultat

Resultatet av laboratorieforsøkene representert i denne oppgaven utgjør datagrunnlaget for diskusjonen i kapittel 7 og konklusjonen i kapittel 8. Det er viktig å presisere at alle resultatene av trykktolkning fra dette kapittelet er fra etter 11.02.2020. Laboratorieforsøkene utført før denne dagen hadde ingen felles tidsreferanse mellom akustisk emisjon og trykk-data, som gjorde disse dataene umulig å korrelere i en felles tolkning.

Vedlegg G.1 viser en felles tabell for alle presenterte testforsøk. Hver test er tilnevnt med et testnummer (File ID), der nummeret er referert til en bestemt dato med tidspunkt. Hver test har unike initialbetingelser i form hovedspenninger, pumperate, og splittet/ikke - splittet hydraulisk sprekk. Eventuelle anisotrope effekter er tolket ut ifra forskjeller i lydshastighetmålingene fra bergartsprøvene (se vedlegg C). I trykktolkningen kan testene deles inn etter 3 kategorier ut ifra hvilken metode som er benyttet under testgjennomføring.

- Test av sprekkelukking med shut-in prosedyre
- Test av sprekkelukking med flowback prosedyre
- Test av sprekkelukking med stegvis jekketest

Alle tester er monitorert med akustisk emisjon, injeksjonstrykk og pumperate. I tillegg er bilder av sprekker over prøvenes overflate sammenliknet med resultater fra akustisk emisjon, presentert i delkapittel 6.1. For grunnleggende teoretisk bakgrunn, se kapittel 3 og 4.

6.1 Tolkning av hydraulisk splittede sprekker

Lukking av hydraulisk åpnet sprekk starter idet injeksjonstrykket er lik normalspenningen (Haimson og Cornet 2003). Dermed er vi interessert i å vite normalspenningen til en sprekk som lukkes under testgjennomføring. For enhver induert sprekk i prøvene som

Tabell 6.1: Tabellen viser observerte sprekkeplan under laboratorie-arbeidet

Sprekkesdata			
Sprekkenummer	Steinprøve	Fallretning	Fallvinkel
101	ID.001	180 °	80 °
201	ID.002	045 °	67 °
301	ID.003	095 °	72 °
302	ID.003	170 °	45 °
303	ID.003	180 °	15 °
401	ID.004	085 °	75 °

oppstod ble det dermed kartlagt fall og fallretning for sprekkeplanene. Gjennom å vite sprekkeplanens plangeometri og hovedspenningene under testgjennomføring kan normalspenningen til enhver test beregnes. Teoretisk beregning av normalspenning gitt plan og hovedspenninger er beskrevet i kapittel 2.

Sprekkes fall og fallretning er tolket etter testutførelse, mens vannmerker fra injeksjon enda er synlig. Gradskive og linjal ble brukt til å måle sprekkeplanet. Tabell 6.1 viser den fullstendige listen over ulike sprekkeplan. Hvilke sprekkeplan som inngår i hver ulik test vil bli beskrevet nærmere i gjennomgangen av resultat.

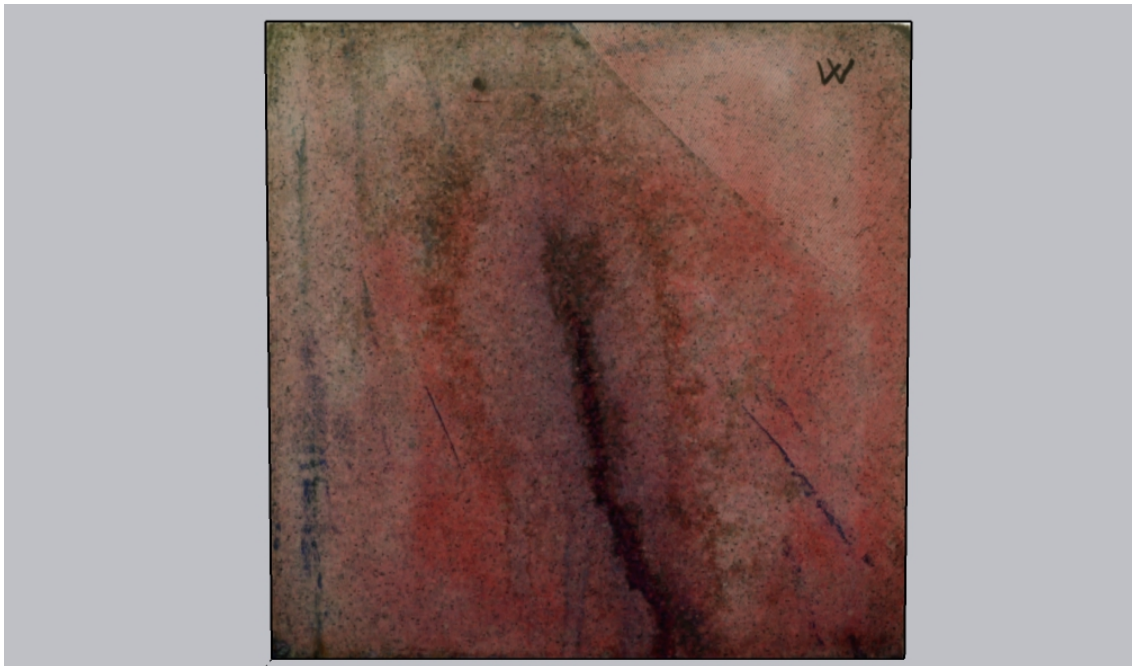
6.1.1 Sprekketolkning ID.001

Totalt 1 sprekkeplan ble tolket i bergartsprøve 001, nummerert som sprekkenummer 101 (se tabell 6.1). Sprekkeplanet ble hydraulisk splittet i testnummer **20191204114206**, med følgende hovedspenninger:

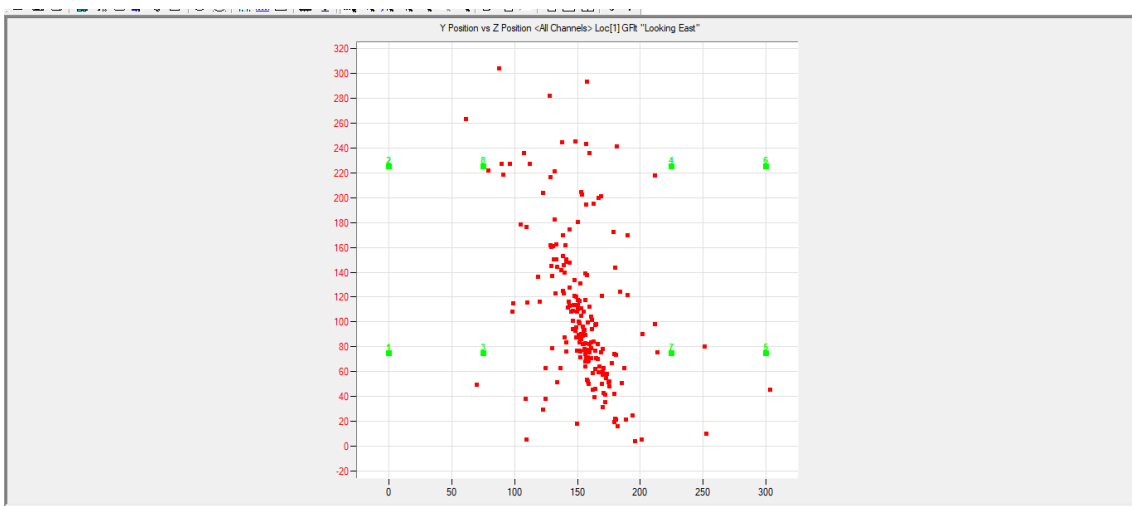
- σ_H i øst-vest retning: 6 MPa
- σ_h i nord-sør retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa

Ut ifra lydshastighetmålinger utført av Henki Ødegaard er det antatt bergartsprøven har svakest foliasjon i vertikal retning.

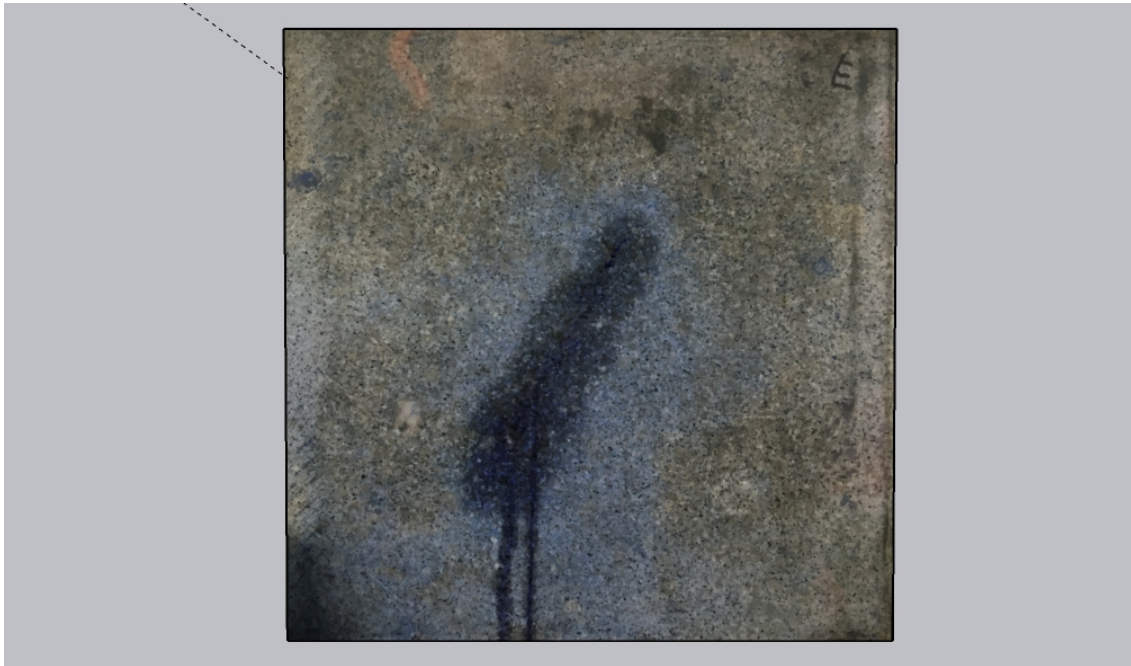
To bilder ble tatt av sprekkeplanens overflate på prøven. **Fig. 6.1** viser prøveoverflaten sett fra vest, med tilsvarende AE events fra jekkeforsøk **20200221133901** av samme sprekkeplan i **fig. 6.2**.



Figur 6.1: Sprekk 101 med farge sett fra vest. Bilde etter Henki Ø. Redigert i SketchUp pro



Figur 6.2: 2D-plott av AE events i prøveID 001 under testforsøk 20200221133901. Tversnitt sett fra vest



Figur 6.3: Sprekk 101 med farge sett fra øst. Bilde etter Henki Ø. Redigert i SketchUp pro.

En sammenlikning av sprekken med bilde og akustiske events er og utført på prøvens østlige side, vist med **fig. 6.3** og **fig. 6.4**. Bilder fra begge sider viser en sterk korrelasjon med akustiske events.

6.1.2 Sprekketolkning ID.002

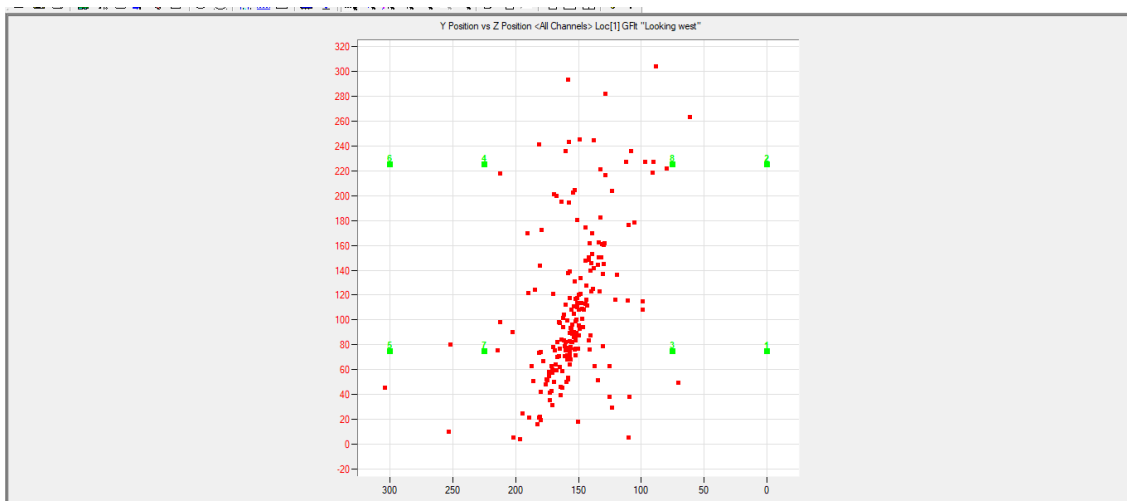
Totalt 1 sprekk ble tolket i bergartsprøve 002, nummerert som sprekkenummer 201 (se tabell 6.1). Sprekken ble hydraulisk splittet i testnummer **20200203115542**, med følgende hovedspenninger:

- σ_H i øst-vest retning: 6 MPa
- σ_h i nord-sør retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa

Fra lyd hastighets-målingene ble bergartsprøven antatt å ha svak foliasjon normalt på Nord-sør og vertikal retning.

Fig. 6.5 viser sprekken sett fra sørøst. Sprekken er et tydelig skråplan og bøyer delvis av på sprekkens østlige (E) overflate.

Videre er et 3D og 2D-plott av akustiske events lagd under testing. Et 3D-plott fra samme splittetest er vist i **fig. 6.6**. Bilder av sprekken i prøvens ulike overflater er vist i vedleggsliste **G.2**, med tilsvarende 2D - plott av AE events.



Figur 6.4: 2D-plott av AE events i prøveID 001 under testforsøk 20200221133901. Tversnitt sett fra øst

6.1.3 Sprekketolkning ID.003

Totalt 3 sprekker ble tolket i bergartsprøve 003, nummerert 301,302 og 303 (se tabell 6.1). Sprekkene ble splittet under forskjellige testgjennomføringer. Fra lyd hastighets-målingene ble bergartsprøven antatt å ha en svak foliasjon normalt på øst-vest retning.

Sprekk **301** ble hydraulisk splittet under test nummer **20200211122403**, med følgende hovedspenninger:

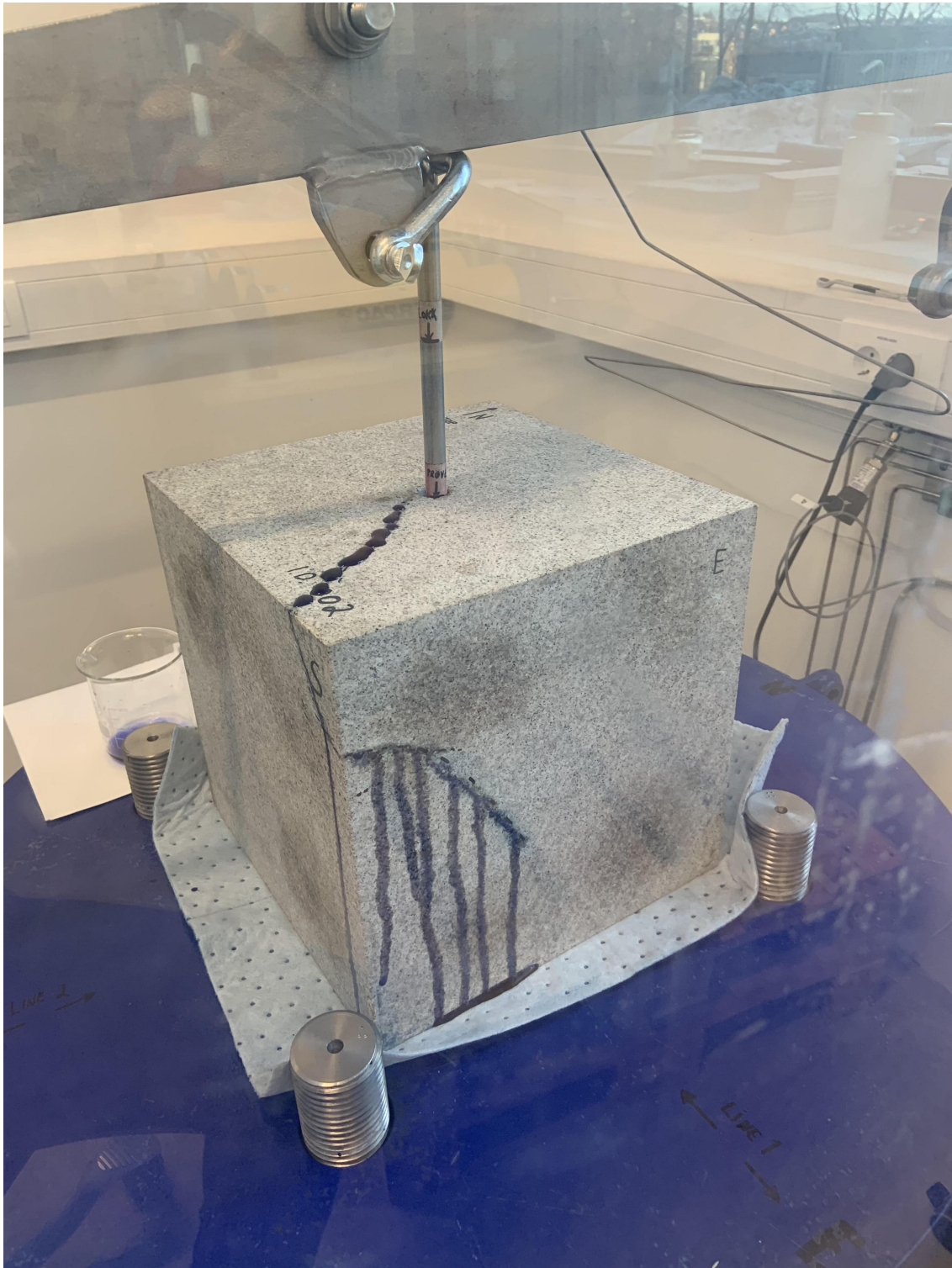
- σ_H i nord-sør retning: 6 MPa
- σ_h i øst-vest retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa

Fig. 6.7 viser tolket sprekk 301 på ID 003 sett fra sør. Planets fall er her i retning øst.

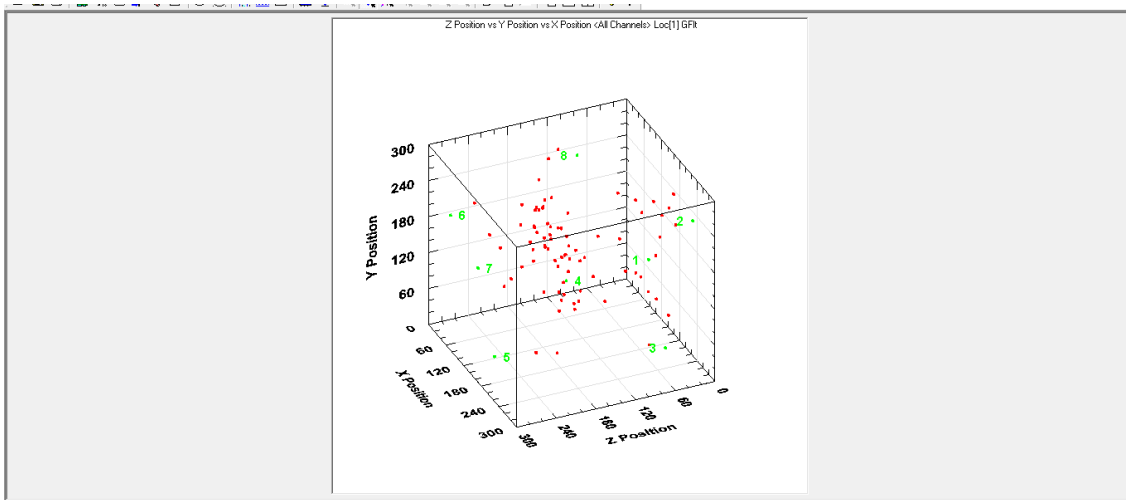
3D og 2D-plott av akustiske events i forbindelse med jekking av sprekk 301 er lagd under testing. Et 3D-plott fra jekketest **20200211135153** er vist i **fig. 6.8**. Jekketesten har samme hovedspenningsfelt som under splittetesten. Bilder av sprekkene i prøvens ulike overflater er vist i vedleggsliste **G.3**, med tilsvarende 2D - plott av AE events.

Sprekk **302** ble splittet under testnummer **20200309124658**, med følgende hovedspenninger:

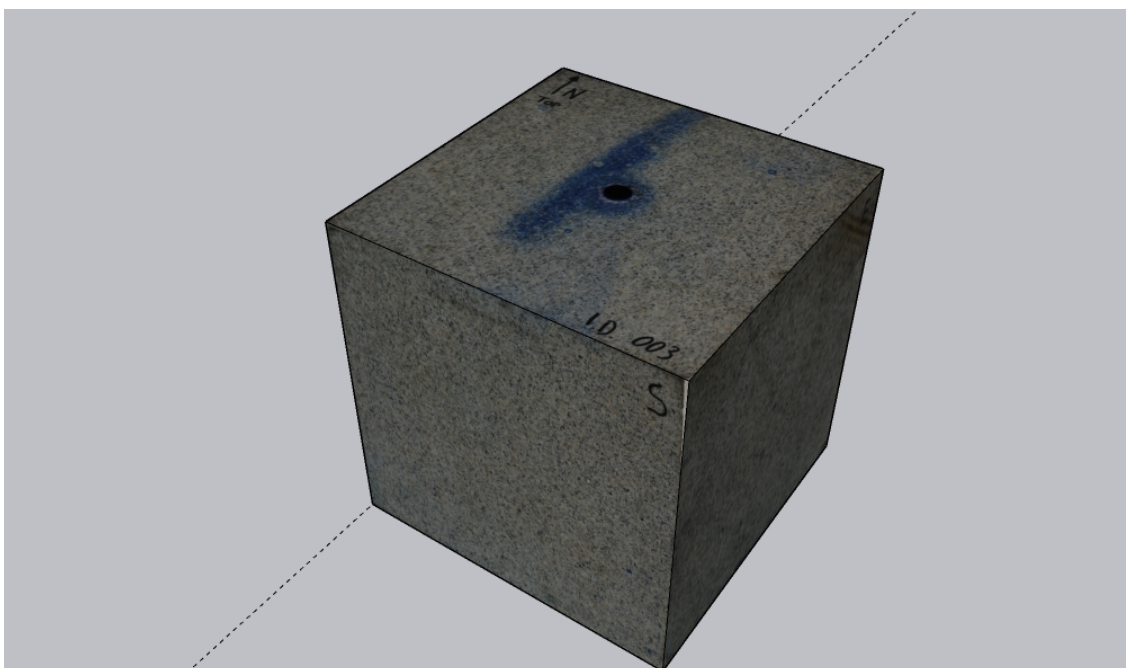
- σ_H i øst-vest retning: 10 MPa
- σ_h i nord-sør retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa



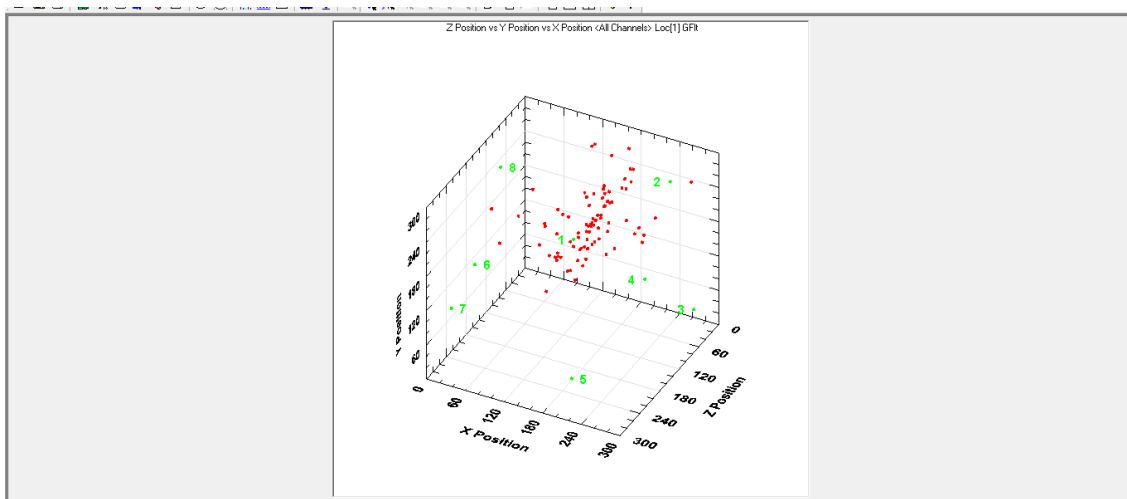
Figur 6.5: Sprekk 201 under fløimming sett fra sørøst.



Figur 6.6: 3D-plott av AE events i prøveID 002 under testforsøk 20200203115542.



Figur 6.7: 3D modell av ID.003 med sprekk 301 markert i methyl-blått. Prøven er sett fra sørøst. Bilder i 3D modellen er tatt 09.03.2020 etter Henki Ø. Modell er laget i SketchUp pro.



Figur 6.8: 3D-plott av AE events i prøveID 003 under testforsøk 20200211135153.

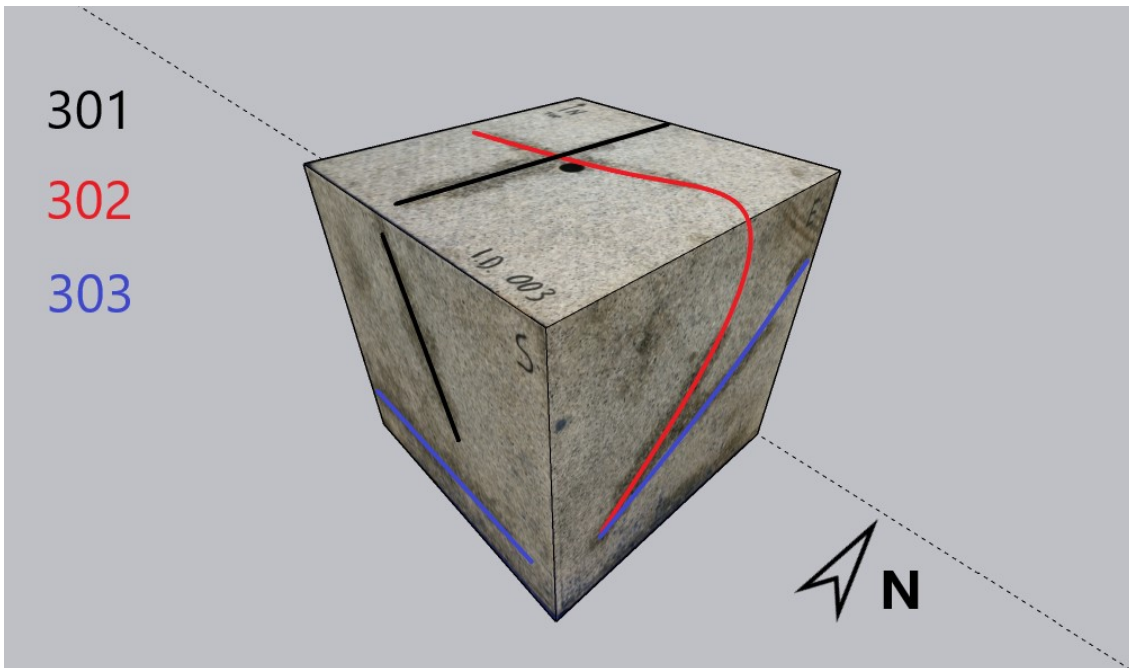
Målet med testen var å skape en sprekk normalt på eksisterende sprekk 301 gjennom å endre de horisontale hovedspenningene. Sprekk 302 har et fall rettet mot sør med skrå fallvinkel (se tabell 6.1).

Sprekk **303** ble splittet under testnummer **20200309134652**, med følgende hovedspenninger:

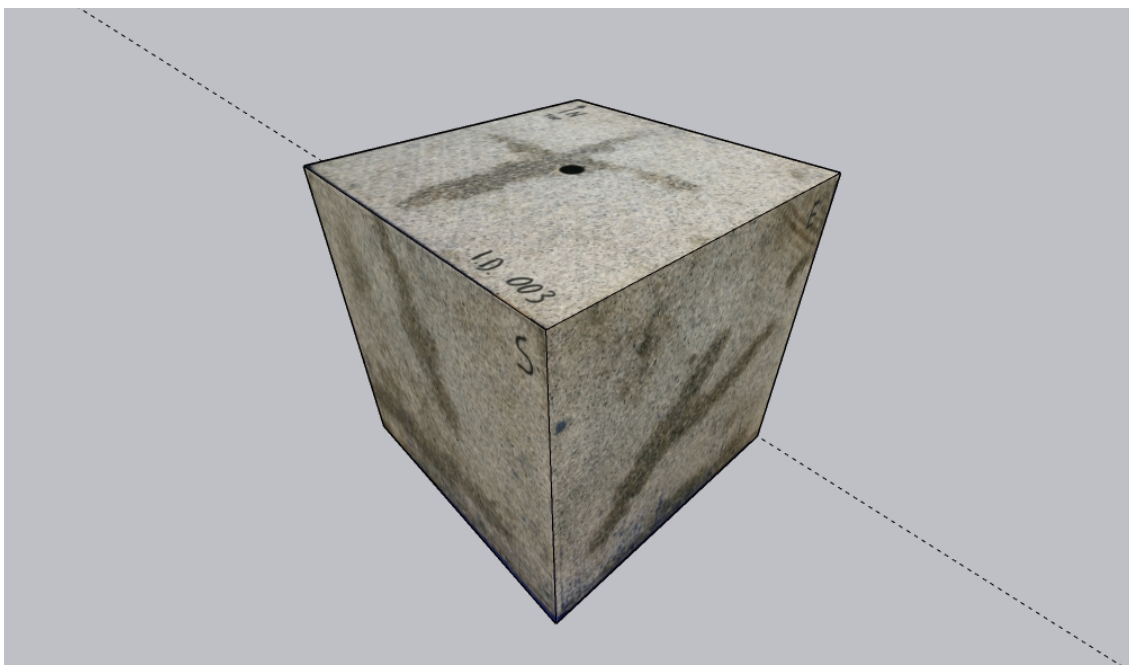
- σ_H i øst-vest retning: 10 MPa
- σ_h i nord-sør retning: 10 MPa
- σ_v vertikalt: 2 MPa

Testens mål var å skape en horisontalt sprekkeplan ved å sette vertikal hovedspenning som minste hovedspenning. Sprekk 303 har en svært svak fallvinkel med retning mot sør (se tabell **6.1**).

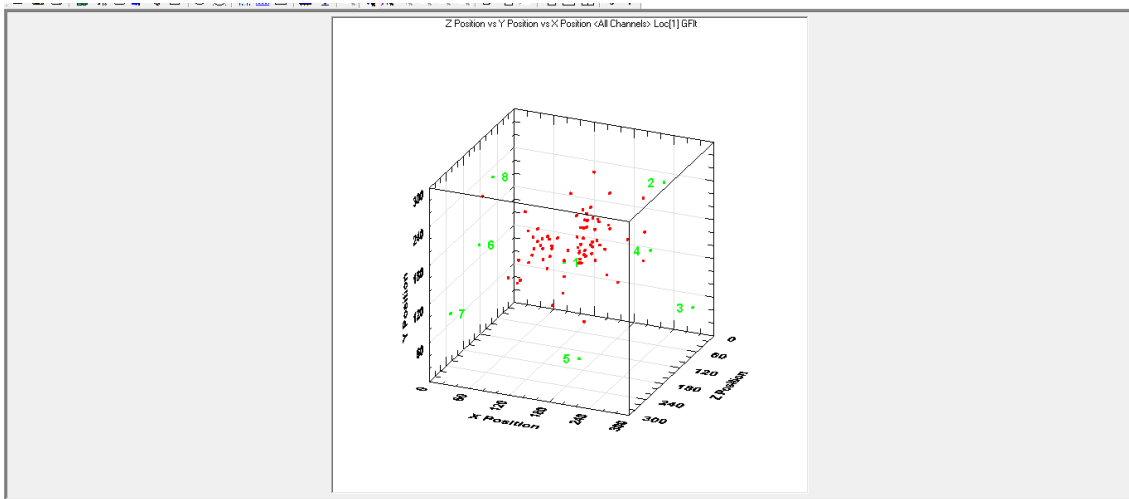
Et fullstendig bilde av sprekk 301,302 og 303 markert er vist i **fig. 6.9**. **Fig. 6.10** viser det samme bildet uten markeringer. Sprekk 301 er i dette bildet mer utviklet enn hva som er vist i **fig. 6.7**. De tre ulike sprekkeplanene skaper et komplekst jekkesystem som er viktig å ta hensyn til i den videre analysen av tester i bergartsprøve 003.



Figur 6.9: 3D modell av ID 003 med tre markerte sprekkeplan nummerert til venstre. Figuren er sett fra sørøst. Bilder i 3D modellen er tatt 09.03.2020 etter Henki Ø. Modell er laget i SketchUp pro.

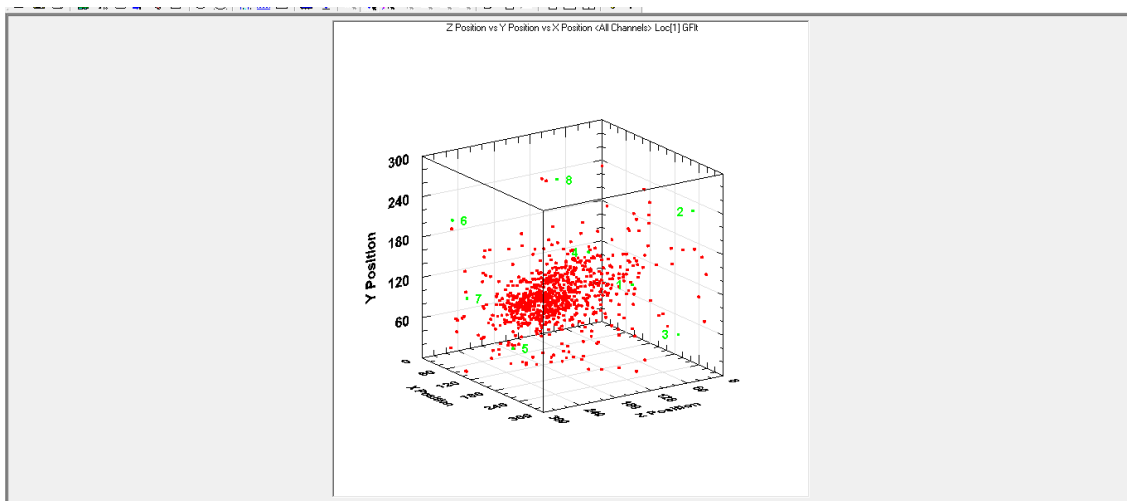


Figur 6.10: 3D modell av ID 003 uten markering. Figuren er sett fra sørøst. Bilder i 3D modellen er tatt 09.03.2020 etter Henki Ø. Modell er laget i SketchUp pro.



Figur 6.11: 3D-plott av AE events i prøveID 003 under testforsøk 20200309124658. Splitting av sprekk 302 sett fra sør.

Det er utført 2D og 3D plott av akustiske events fra jekking av sprekkenummer 302 og 303. 3D plott av testnummer **20200309124658** i **fig. 6.11** viser akustiske events under splitting av sprekk 302. 3D plott av testnummer **20200309140146** i **fig. 6.12** viser akustiske events under jekking av sprekk 303. Sistnevnte testnummer hadde samme spenningsforhold som under splittingen av 303 og er dermed begrunnet som representativ i tolkning av sprekken. Dette er samme test som er benyttet under flowback test 2 (se delkapittel 6.3). 2D plott fra samme testnumre med tilsvarende bilder av prøvens overflate er vist i vedleggsliste **G.4**.



Figur 6.12: 3D-plott av AE events i prøveID 003 under testforsøk 20200309140146. Jekking av sprekk 303 sett fra sørøst

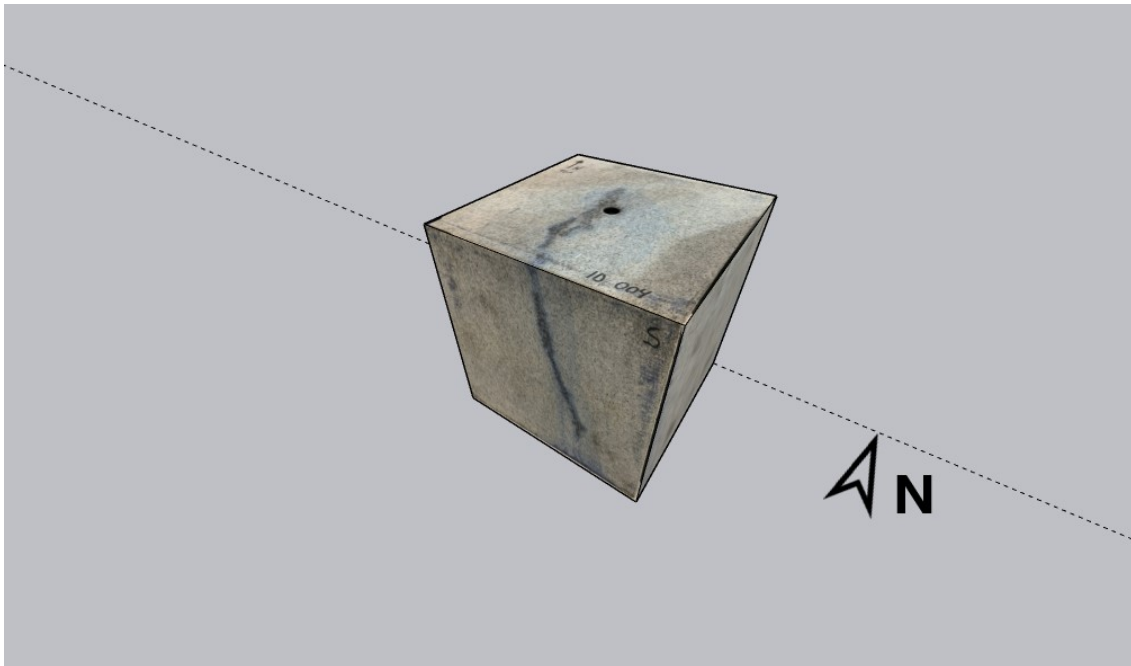
6.1.4 Sprekketolkning ID.004

Totalt 1 sprekk ble tolket i bergartsprøve 004, nummerert som sprekkenummer 401 (se tabell 6.1). Sprekken ble hydraulisk splittet i testnummer **20200428141728**, med følgende hovedspenninger:

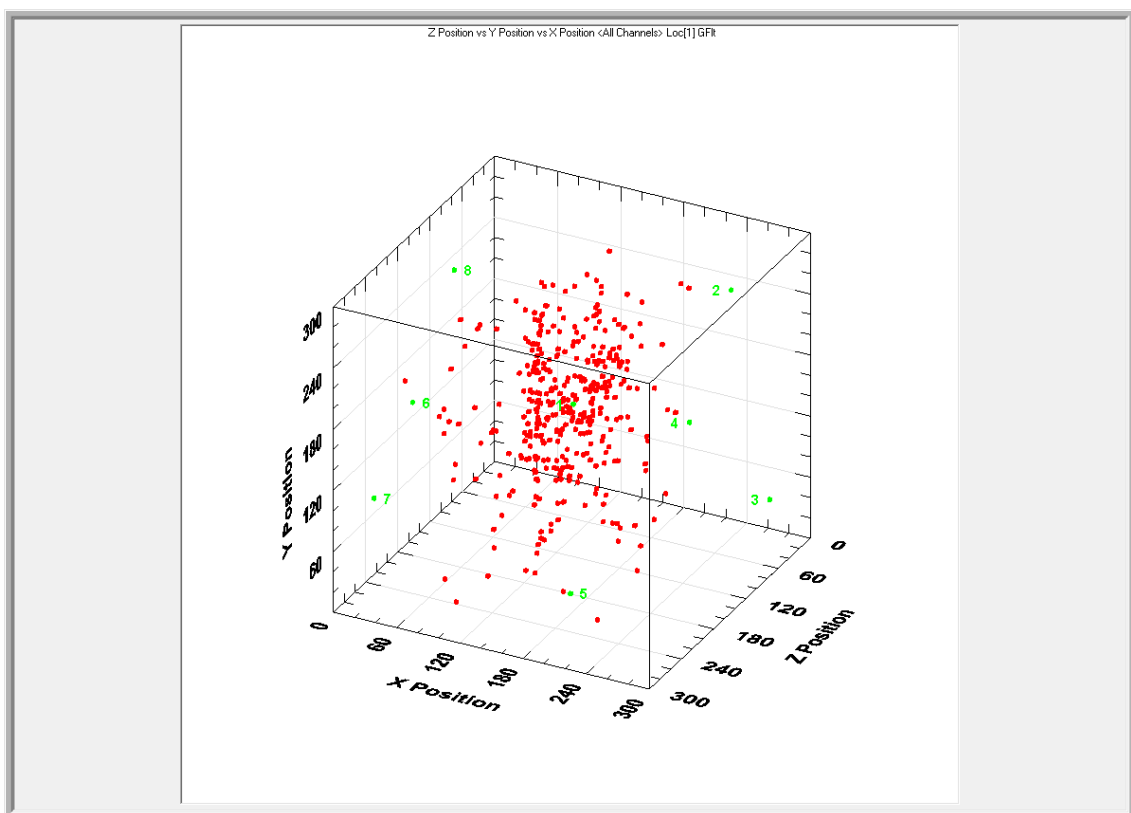
- σ_H i nord-sør retning: 6 MPa
- σ_h i øst-vest retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa

Fra lyd hastighets-målingene ble bergartsprøven antatt å ha svak foliasjon normalt på øst-vest retning.

Fig. 6.13 viser sprekken sett fra sørøst. Sprekken er et bratt skråplan med fallretning mot øst. 3D plottet av AE events fra samme test er vist i **fig. 6.14**. Vedleggsliste **G.5** inneholder 2D - plott av akustiske events satt opp mot bilder av sprekkens overflate på prøven.



Figur 6.13: 3D modell av ID.004 med sprekk 401 markert i metyl-blått. Prøven er sett fra sørøst. Bilder i 3D modellen er tatt 28.04.2020 og er laget i SketchUp pro.



Figur 6.14: 3D-plott av AE events i prøve ID.004 under testforsøk 20200428141728. Sett fra sørøst

6.2 Vurdering av shut-in tester

I dette delkapittelet er målinger av to shut-in tester presentert med akustisk emisjon og injeksjonstrykk. AE aktiviteten er representert med parameteren *count rate*, kjent som telleraten på norsk. Count raten er her definert som summen av antall digitale pulser fra AE treff i alle sensorer per millisekund. Parameterens teoretiske bakgrunn er beskrevet nærmere i delkapittel 4.2, side 45. Hovedformålet med å bruke count raten er å påvise distinkt AE aktivitet under shut-in fasen i testforsøkene. Ratene er regnet ut i excel. Grafene som er presentert i dette delkapittelet viser trykk markert i oransje farge og count rate i blå farge.

Videre er en tolkning av sprekkelukking kun utført ifra injeksjonstrykk utført, med en $\frac{dt}{dP}$ mot P . Metoden er forklart nærmere i delkapittel 3.4. Dataene av injeksjonstrykk P er loggført i millisekunder. Funksjonen $\frac{dt}{dP}$ er regnet ut i excel basert på loggførte data av injeksjonstrykk og tid. Formålet med den grafiske tolkningen er å finne en overgang fra en lineær fase som skal inntreffe før lukking til en ikke-lineær fase som inntreffer etter lukking. Overgangen er tolket som shut-in trykket P_s .

6.2.1 Shut in test 1

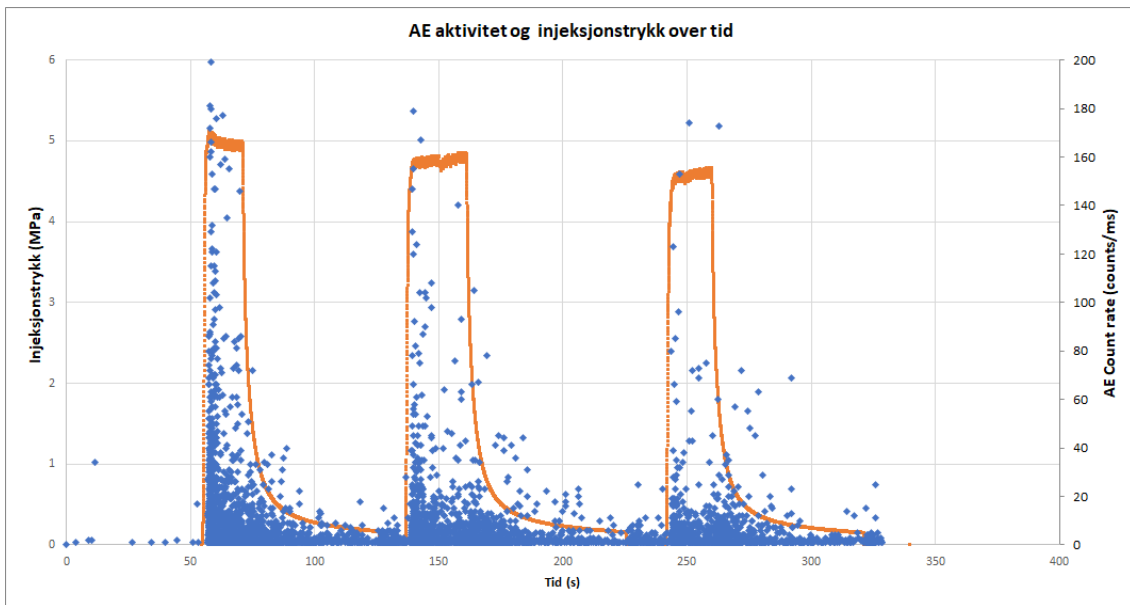
Shut-in test 1 er oppført som testnummer **20200211130903**, med følgende hovedspenninger:

- σ_H i nord-sør retning: 6 MPa
- σ_h i øst-vest retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa

Testen er en jekketest med shut-in fase under lukking av sprekk, og er utført på ID 003.

Videre er det sprekk 301 som er tolket til å åpnes og lukkes under testen. Gitt hovedspenningene, fall og fallretningen til sprekk 301, er sprekkens normalspenning σ_n beregnet til å være på **2.1 Mpa**. Dermed forventes lukking av sprekk å inntreffe under shut-in fasen på 2.1 MPa.

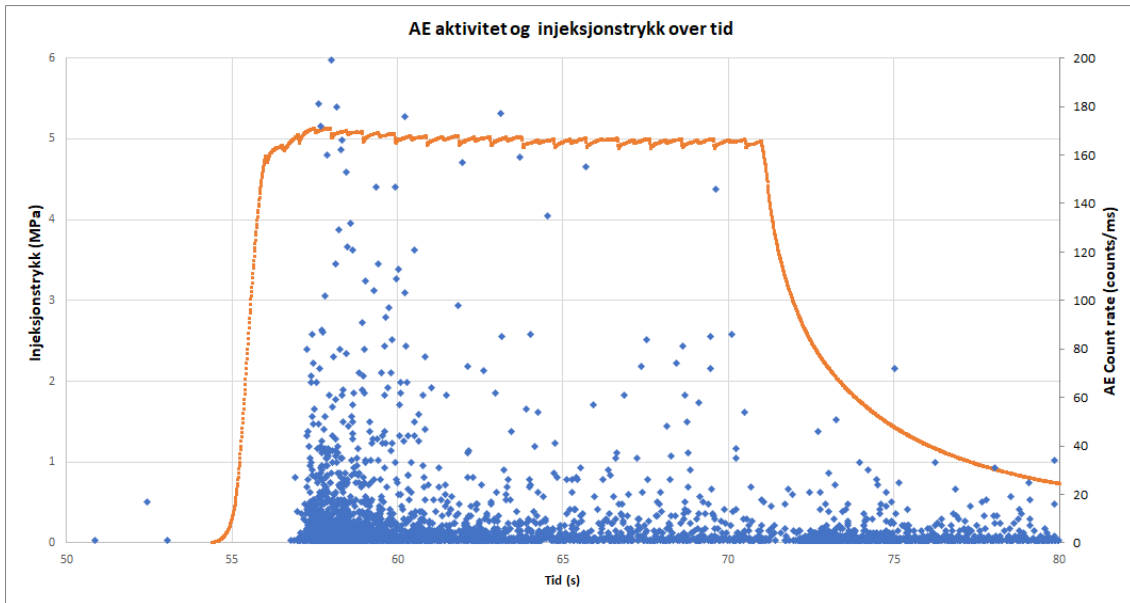
Testforsøkets fullstendige gjennomgang med injeksjonstrykk og AE aktivitet er vist i **fig. 6.15**. Testens første jekking er gjennomgått i **fig. 6.16, 6.17 og 6.18**, mens resterende jekkesykluser henvises til i vedleggsliste **H.1**.



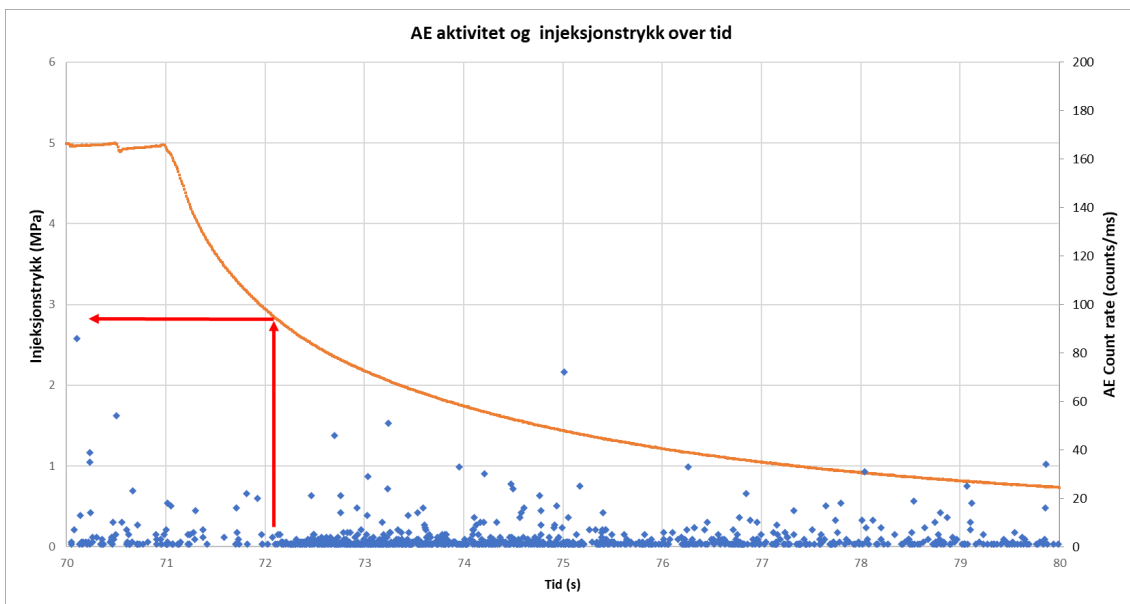
Figur 6.15: Trykk og AE aktivitet av test 20200211130903

Figur. 6.16 illustrer en sterk oppgang i AE aktivitet ett sekund etter at trykket flater ut under pumping. En rask utflating av makstrykk bekrefter generell jekking av sprekk og lite tegn til splitting. AE aktiviteten holder seg så relativt stabil under pumpefasen fram til shut-in, som opptrer på 71 sekund. Et detaljert overblikk over shut-in fasen i **fig. 6.17** viser en overgang fra redusert AE aktivitet i shut-in fasens startområde til økende AE aktivitet ved 72 sekund. Lukking er her tolket med rød linje, til et trykk tilsvarende **2,8 MPa**. Tolkningen avviker fra det forventede lukketrykket på 2.1 MPa.

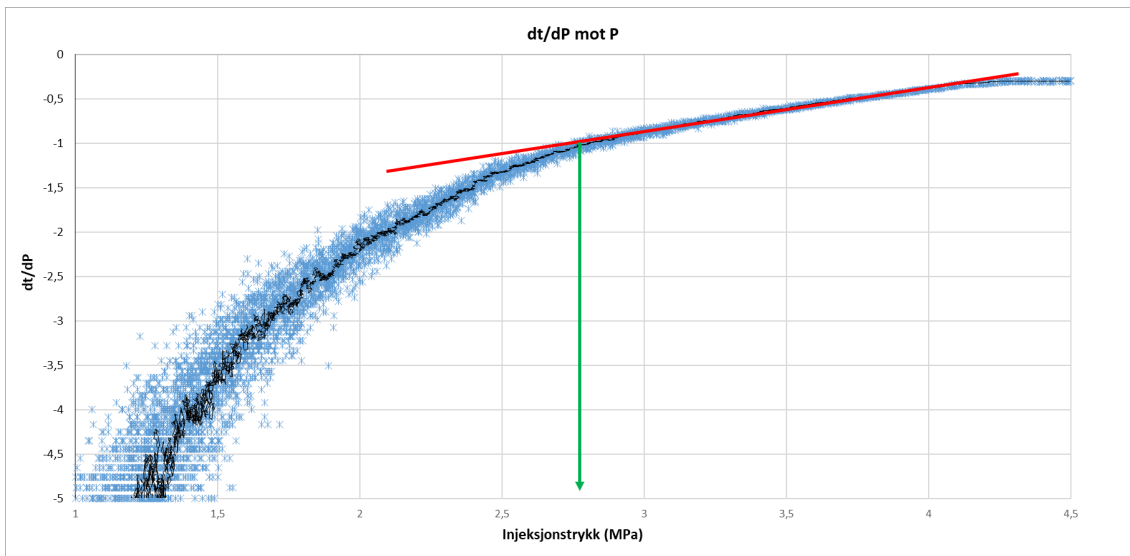
En trykkanalyse med $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P er vist for shut-in fasen under første jekking av test i **fig. 6.18**. Overgang fra lineær til ikke-lineær fase er tolket til å inntreffe på 2,8 MPa, som representerer shut-in trykket P_s



Figur 6.16: Trykk og AE aktivitet i første jekking under test 20200211130903



Figur 6.17: Trykk og AE aktivitet under shut-in fasen for første jekking under test 20200211130903. Tolket lukking fra AE aktivitet er vist med røde linjer.



Figur 6.18: $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P i shut-in fasen for første jekking under test 20200211130903. Tolket trykk ved lukking av sprekk er vist med grønn linje, mens lineær startfase er vist med rød linje.

Tilsvarende grafer for de to siste jekkingene under test **20200211130903** er vist i vedlegg **H.1**. Tilsammen utgjør grafene en tolkning for shut-in trykket P_s , satt opp mot den forventede normalspenningen σ_n . En fullstendig oversikt av tolkede resultat og avvik fra normalspenning er satt opp i tabell **6.2**. Tabellen viser en tydelig overestimering av forventet shut-in trykk.

Tabell 6.2: Tabellen viser en oversikt over estimerte verdier for shut-in trykket under testnummer 20200211130903

Estimerte verdier for shut-in trykk, testnummer 20200211130903			
Trykksyklus	Tolkningstype	Estimert P_s (MPa)	Avvik fra utregnet normalspenning ($P_s - \sigma_n$)
Første jekking	AE aktivitet	2,8	0,7
Andre jekking	AE aktivitet	2,6	0,5
Tredje jekking	AE aktivitet	2,5	0,4
Første jekking	$\frac{dt}{dP}$ mot P	2,8	0,7
Andre jekking	$\frac{dt}{dP}$ mot P	3,1	1
Tredje jekking	$\frac{dt}{dP}$ mot P	3,2	1,1

6.2.2 Shut-in test 2

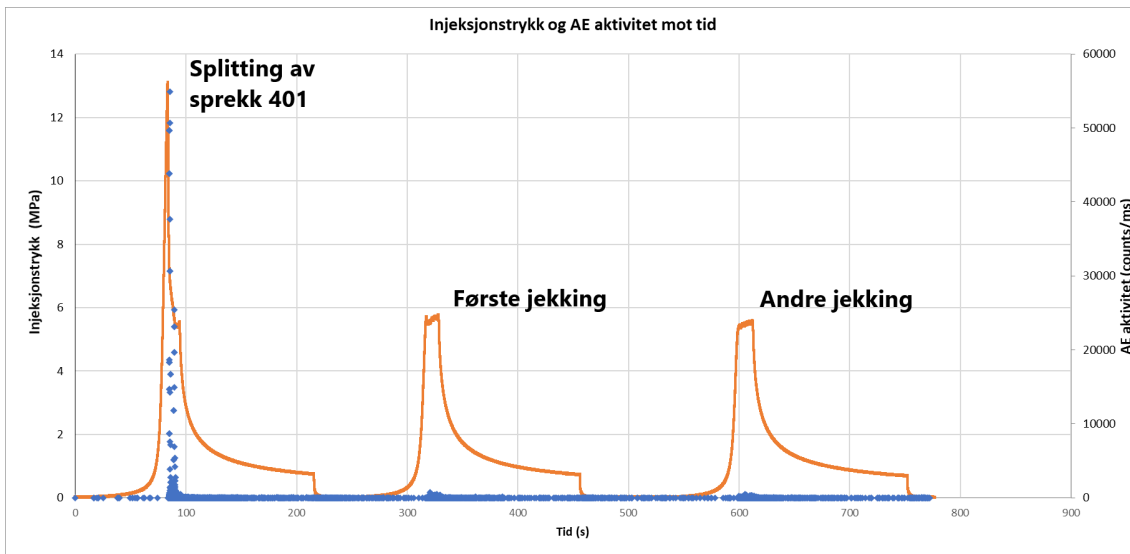
Shut-in test 2 er oppført som testnummer **20200428141728**, med følgende hovedspenninger:

- σ_H i nord-sør retning: 6 MPa
- σ_h i øst-vest retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa

Testen er en splittetest med shut-in fase under lukking av sprekk, og er utført på ID 004.

Dette er den samme testen brukt i tolkningen av sprekkenummer 401 med AE events (se delkapittel 6.1.4). Gitt hovedspenningene, fall og fallretningen til sprekk 401, er sprekkens normalspenning σ_n beregnet til å være på **2.1 Mpa**. Dermed forventes lukking av sprekk å inntreffe under shut-in fasen på 2.1 MPa.

Testforsøkets fullstendige gjennomgang med injeksjonstrykk og AE aktivitet er vist i **fig. 6.19**. Testens første splitterunde er gjennomgått i **fig. 6.20, 6.21** og **6.22**, mens resterende jekkesykluser henvises til i vedleggsliste **H.2**.

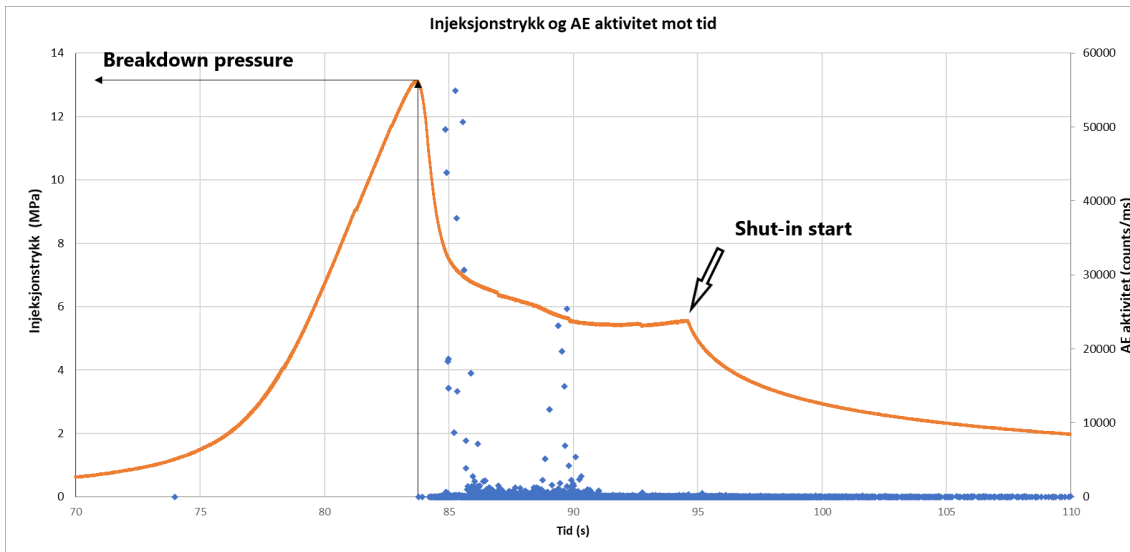


Figur 6.19: Trykk og AE aktivitet av test 20200428141728. Tolket splitting og jekking av sprekk 401 er markert

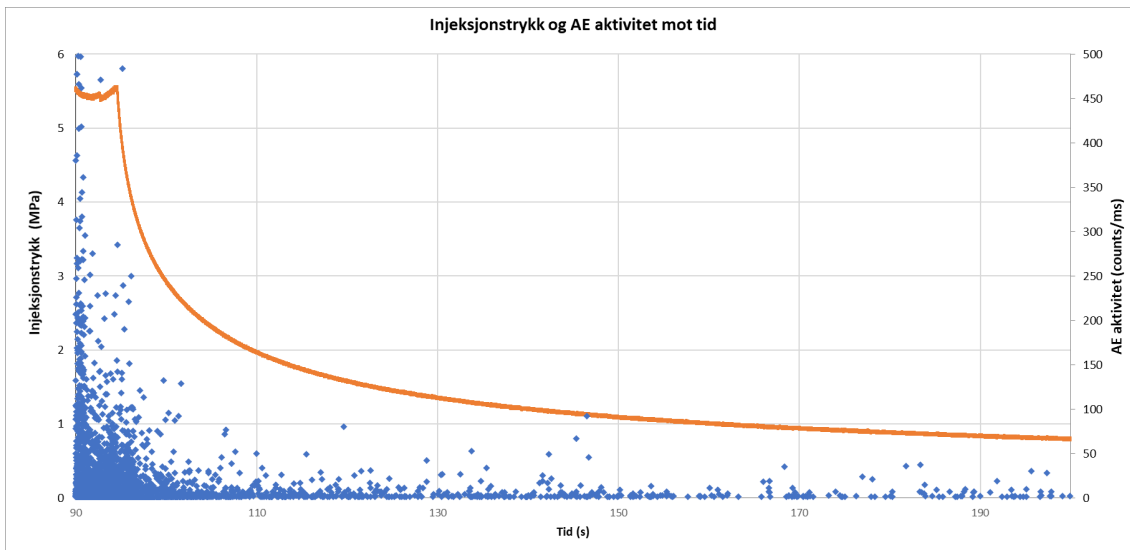
En tydelig splitting av ID.004 kan ses både i **fig. 6.19** og **6.20**. AE aktiviteten er svært distinkt rett etter trykktopp for splitterunden. Den maksimale count raten inntreffer 1 sekund etter trykktopp (se **fig. 6.20**). Maksverdien for count raten er her på 55000 counts per millisekund, som er svært høyt. En ny topp i count rate inntreffer på 89 - 90 sekund. Den korresponderer med en utflating av injeksjonstrykket under pumping.

Shut-in fasen under splitterunden til testen er vist i **fig. 6.21**. Figuren viser brå nedgang i aktivitet etter starten av shut-in. Ingen markant oppgang i AE aktivitet er synlig under shut-in. Dermed er det ingen tegn til at lukking av sprekk her induserer AE aktivitet.

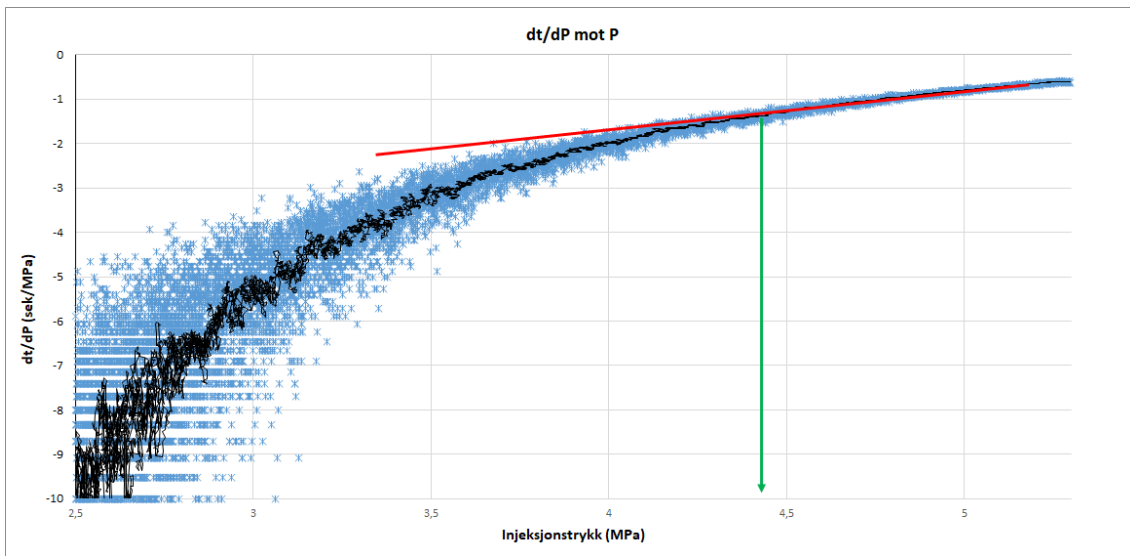
En trykkanalyse med $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P er vist for shut-in fasen under første runde av test i **fig. 6.22**. Overgang fra lineær til ikke-lineær fase er tolket til å inntreffe på 4,4 MPa, som representerer tolkningen av shut-in trykket P_s .



Figur 6.20: Trykk og AE aktivitet i første pumperunde under test 20200428141728. Breakdown trykket P_b og start for shut-in fasen er markert.



Figur 6.21: Trykk og AE aktivitet under shut-in fasen for første pumperunde under test 20200428141728. Ingen distinkt AE respons observert.



Figur 6.22: $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P i shut-in fasen for splitterunden under test 20200428141728. Tolket trykk ved lukking av sprekk er vist med grønn linje, mens lineær startfase er vist med rød linje.

Tilsvarende grafer for de to siste jekkingene under testforsøket er vist i vedlegg **H.2**. I likhet med splitterunden viser resterende jekkinger i testrunden ingen tydelig AE aktivitet under lukking av sprekk i shut-in fasen. En fullstendig oversikt av tolkede resultat og avvik fra normalspenning er satt opp i tabell **6.3**. Estimerte verdier for P_s er over 2 MPa høyere enn forventet.

Tabell 6.3: Tabellen viser en oversikt over estimerte verdier for shut-in trykket under testnummer 20200428141728

Estimerte verdier for shut-in trykk, testnummer 20200428141728			
Trykksyklus	Tolkningstype	Estimert P_s (MPa)	Avvik fra utregnet normalspenning ($P_s - \sigma_n$)
Splitting	AE aktivitet	Ingen grunnlag	Ingen grunnlag
Første jekking	AE aktivitet	Ingen grunnlag	Ingen grunnlag
Andre jekking	AE aktivitet	Ingen grunnlag	Ingen grunnlag
Splitting	$\frac{dt}{dP}$ mot P	4,4	2,3
Første jekking	$\frac{dt}{dP}$ mot P	4,6	2,5
Andre jekking	$\frac{dt}{dP}$ mot P	4,4	2,3

6.3 Vurdering av flowback tester

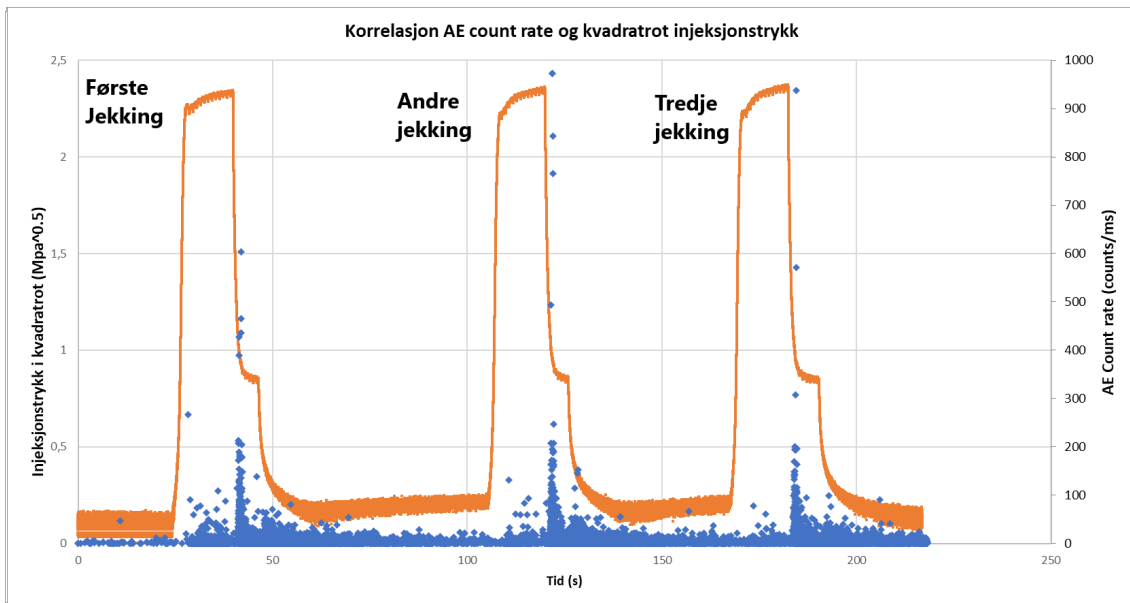
I dette delkapittelet er to flowback tester presentert med data av akustisk emisjon og injeksjonstrykk. På samme måte som under shut-in testene er AE aktiviteten representert med parameteren *count rate*, som blir brukt for å kunne påvise en sammenheng mellom lukking av sprekk og mikroseismisk aktivitet. Videre er injeksjonstrykket representert med kvadratroten av trykket. Kvadratroten er brukt for å kunne påvise lineære forløp i trykkgrafene. Et knekk i et lineært mønster under flowback-fasen er å tolke som en endring i testens system stivhet og en overgang fra åpen sprekk til lukking av sprekk.

Den tidsderiverte av trykket analysert mot tid. En generell endring i den derivertes stigningstall under flowback er tolket som en faseendring fra åpen sprekk til lukking av sprekk. Tidspunktet for endringen i stigningstallet til $\frac{dP}{dt}$ er dermed tolket som trykket der lukking av sprekk starter og er et mål på shut-in trykket P_s . Plottene av den deriverte er representert med et grønt sekundærplott med en svart trendlinje. Tolkningen av shut-in trykket ved bruk av kvadratrot og den tidsderiverte er beskrevet nærmere teoretisk i delkapittel 3.6 og er inspirert av arbeidet til Raaen et al. (2001) og Gederaas et al. (2009).

6.3.1 Flowback test 1

Flowback test 1 er oppført som testnummer **20200221133901**, med følgende hovedspenninger:

- σ_H i Øst-vest retning: 6 MPa
- σ_h i Nord-sør retning: 3 MPa
- σ_v vertikalt: 4 MPa



Figur 6.23: Injeksjonstrykk i kvadratrot og AE aktivitet av testnummer 20200221133901. Jekkesykluser er markert.

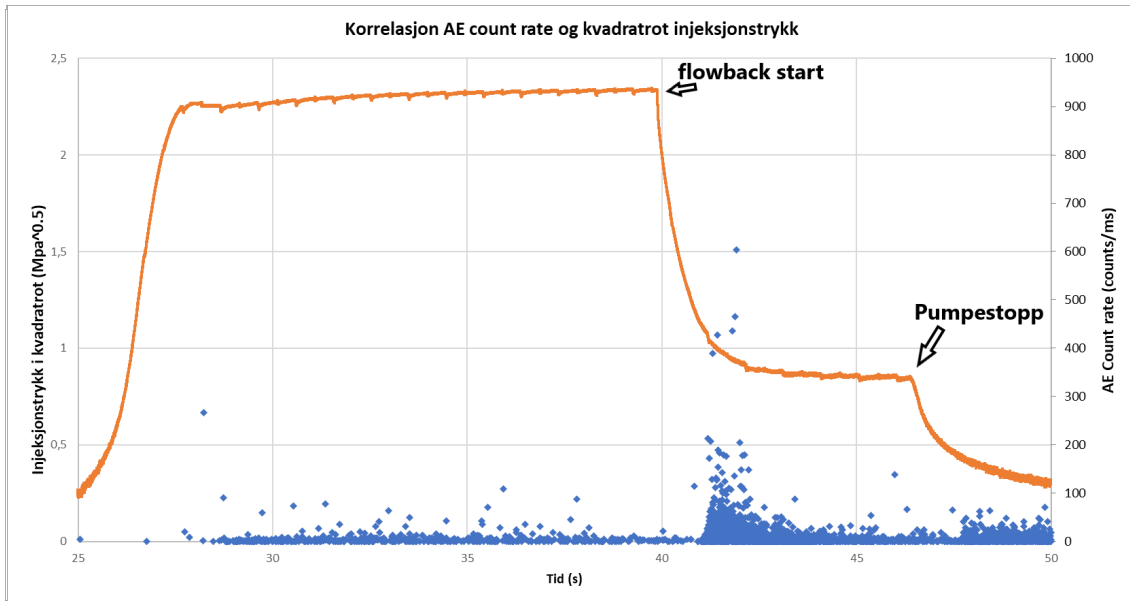
De initielle hovedspenningene har liten grad av anisotropi. Dette medfører at minste tangensialspenning langs borveggen er forventet å være på 3 MPa. Dermed er minste hovedspenning og minste tangensialspenning antatt like for testen. Testen er en jekketest med flowback fase under lukking av sprekk. Forsøket er utført på ID 001, sprekk 101. Pumperaten er satt til 30 ml/min og strupingen er kalibrert til 0,6 MPa.

Gitt hovedspenningene, fall og fallretningen til sprekk 101, er sprekkens normalspenning σ_n beregnet til å være på **3,0 MPa**. Dermed forventes lukking av sprekk å inntreffe under flowback-fasen på 3,0 MPa. For mål av trykk i kvadratrot innebærer det en forventning av lukking på $1,73 \sqrt{MPa}$.

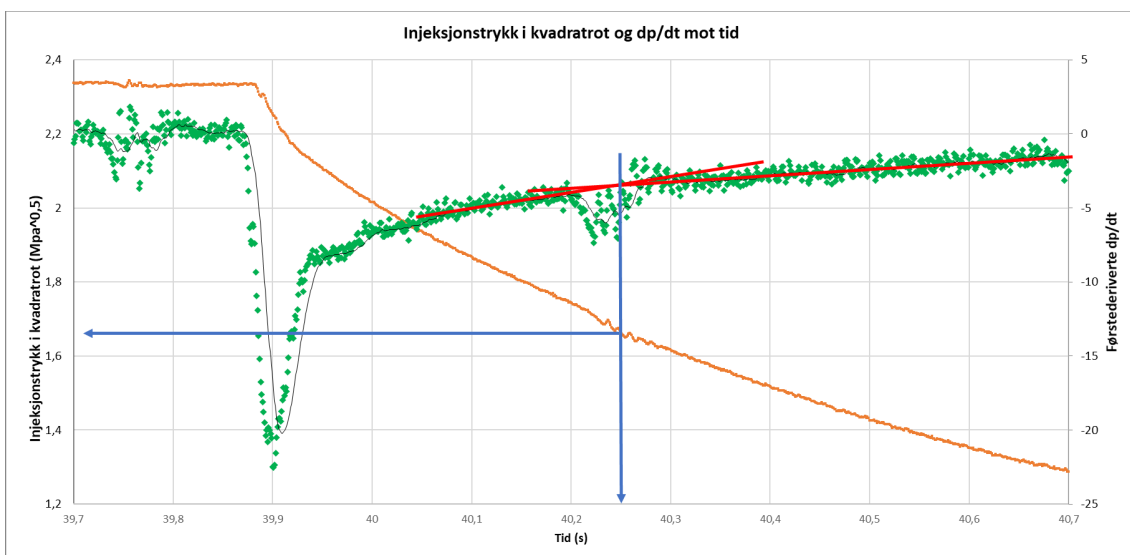
Testforsøkets fullstendige gjennomgang med injeksjonstrykk og AE aktivitet er vist i **fig. 6.23**. Testens første jekkerunde er gjennomgått i **fig. 6.24, 6.25, 6.26 og 6.27**, mens resterende jekkesykluser henvises til i vedlegg **I.1**.

Totalt 3 forskjellige tolkningsgrunnlag for P_s i første jekking av testen er utført. **Fig. 6.25** viser en svak endring i den derivertes stigningstall ved 40,25 sekund. En tolkning av endringen i kvadratrotplottet viser en endring ved 40,29 sekund (**6.26**). Begge disse tolkningene gir et resultat nærme den forventede verdien $1,73 \sqrt{MPa}$.

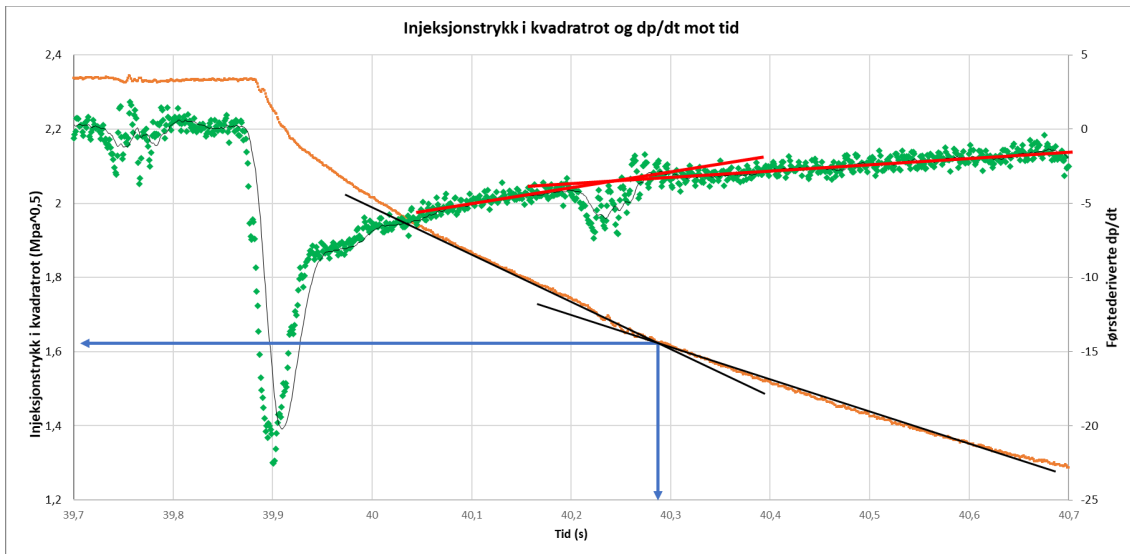
Det er ellers viktig kommentere to effekter i trykkplottet som kompliserer tolkningen. Startfasen av flowback viser en svært bratt bunn i den deriverte. Kilden til dette avviket er tolket som tap av friksjon i injeksjonslinjen, og er dermed utelukket i tolkningen av sprekkelukkingen. Den andre effektene er pulseringen fra pumperaten. Pumpeslagene kan ses igjen på trykkgrafene mellom 40,2 og 40,3 sekund, og påvirker både plottet for injek-



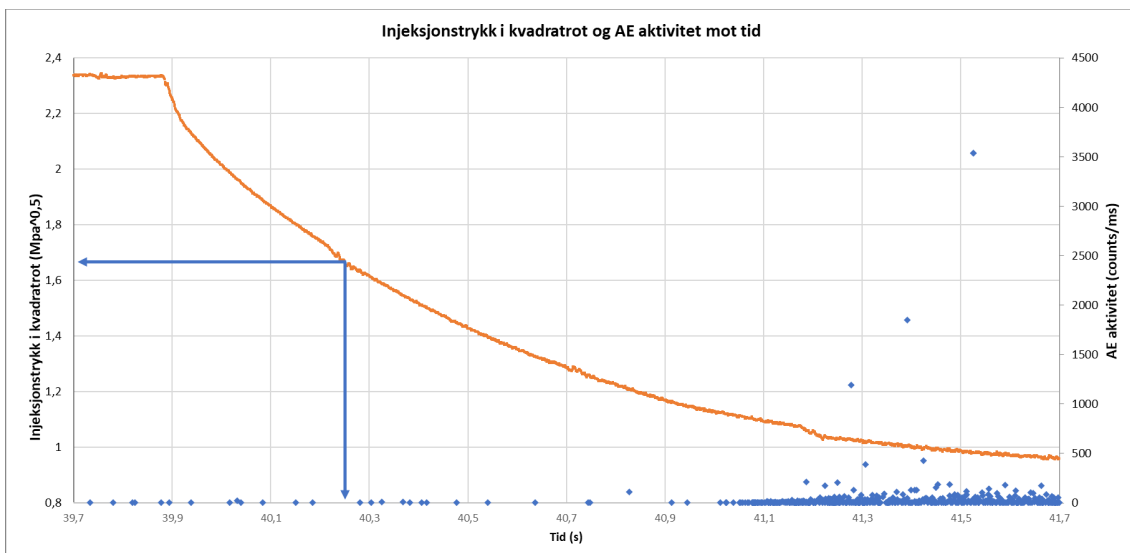
Figur 6.24: Injeksjonstrykk i kvadratrot og AE aktivitet i første jekkesyklus av testnummer 20200221133901. Tydelig endring i AE aktivitet rundt 41 sekund.



Figur 6.25: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte av injeksjonstrykk under flowback av første jekkesyklus i testnummer 20200221133901. Endring i den derivertes stigning er vist med røde linjer som krysser hverandre. Krysningspunktet er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.



Figur 6.26: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte av injeksjonstrykk under flowback av første jekksyklus i testnummer 20200221133901. Et knekkpunkt i kvadratrotten av injeksjonstrykket er her tolket med to svarte linjer. Krysningpunktet for de svarte linjene er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.



Figur 6.27: Trykk og AE aktivitet under flowback fasen for første pumperunde under test 20200221133901. Distinkt AE aktivitet ved 41,1 sekund. De blå linjene viser den tidligere tolkningen av shut-in trykket i 6.26

Tabell 6.4: Tabellen viser en oversikt over estimerte verdier for shut-in trykket under testnummer 20200221133901

Estimerte verdier for shut-in trykk, flowback-test 20200221133901			
Trykksyklus	Tolkningstype	Estimert P_s (MPa)	Avvik fra utregnet normalspenning ($P_s - \sigma_n$)
Første jekking	AE aktivitet	1,2	-1,8
Andre jekking	AE aktivitet	1,2	-1,8
Tredje jekking	AE aktivitet	1,4	-1,6
Første jekking	$\frac{dP}{dt}$ mot tid	2,7	-0,3
Andre jekking	$\frac{dP}{dt}$ mot tid	2,6	-0,4
Tredje jekking	$\frac{dP}{dt}$ mot tid	3	0
Første jekking	\sqrt{P} mot tid	2,6	-0,4
Andre jekking	\sqrt{P} mot tid	2,4	-0,6
Tredje jekking	\sqrt{P} mot tid	2,6	-0,4

sjonstrykket i kvadratrot og den deriverte.

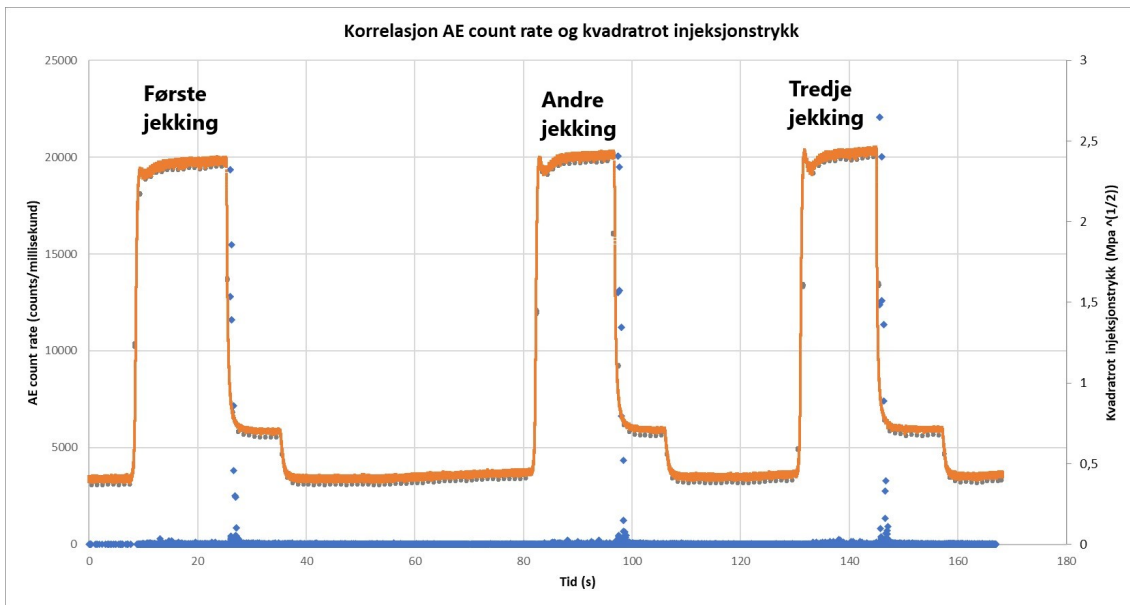
I **fig. 6.27** vises en tydelig AE respons på 41,1 sekund, med tilnærmet ingen aktivitet før dette tidspunktet. Videre viser **fig. 6.24** at AE aktiviteten er aktiv langs i lang tid etter 41 sekund. Selv om AE aktiviteten er klar og distinkt, opptrer den svært forsinket i forhold til forventet tidspunkt for sprekkelukking.

Tilsvarende grafer for de to siste jekkingene under testforsøket er vist i vedleggsliste **I.1**. Jekkingene viser den samme trenden med forsinket AE aktivitet. En fullstendig oversikt av tolkede resultat og avvik fra normalspenning er satt opp i tabell **6.4**. Tabellen viser at tolkningen av den trykkets tidsderiverte gir et best estimat i forhold til forventningen om en normalspenning 3 MPa.

6.3.2 Flowback test 2

Flowback test 2 er oppført som testnummer **20200309140146**, med følgende hovedspenninger:

- σ_H i Øst-vest retning: 10 MPa
- σ_h i Nord-sør retning: 10 MPa
- σ_v vertikalt: 2 MPa

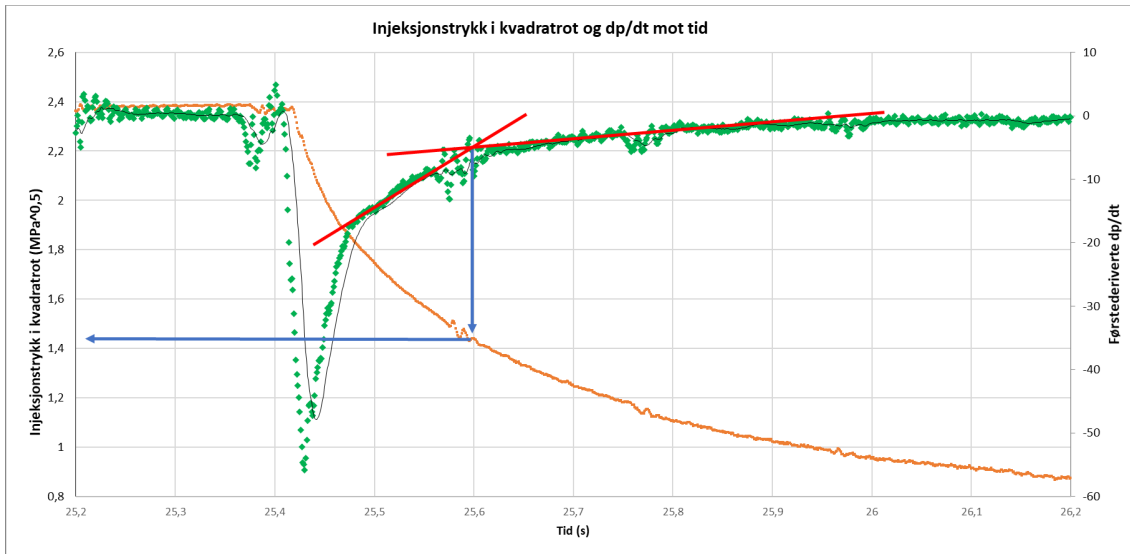


Figur 6.28: Injeksjonstrykk i kvadratrot og AE aktivitet av testnummer 20200309140146. Jekkesykluser er markert.

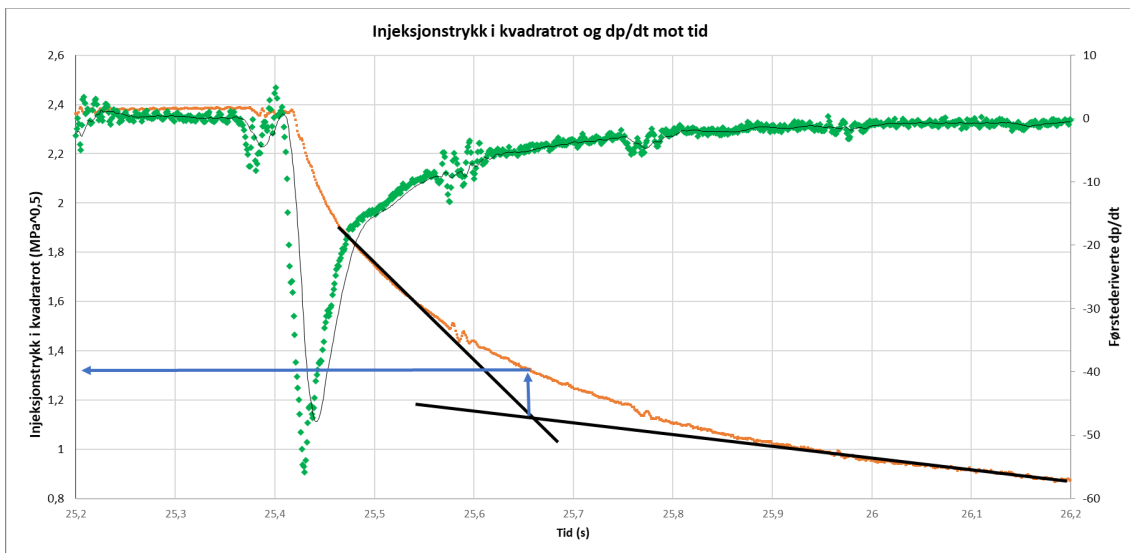
De initielle hovedspenningene har svært stor grad av anisotropi, med svakeste hovedspenning i vertikal retning. Testen er en jekketest med flowback fase under lukking av sprekk, og er utført på ID 003. Bilder og AE events av samme test er vist for sprekk 303 i delseksjon 6.1.3. Det er derfor sprekk 303 som er tolket jekket i denne testen. Pumperaten er satt til 75 ml/min, som er betydelig høyere enn under flowback test 1. Strupningen er kalibrert til 0,6 MPa.

Gitt hovedspenningene, fall og fallretningen til sprekk 303, er sprekkens normalspenning σ_n beregnet til å være på **2,5 MPa**. Dermed forventes lukking av sprekk å inntreffe under shut-in fasen på **2,5 MPa**. For mål av trykk i kvadratrot innebærer det en forventning av lukking på $1,58 \sqrt{MPa}$.

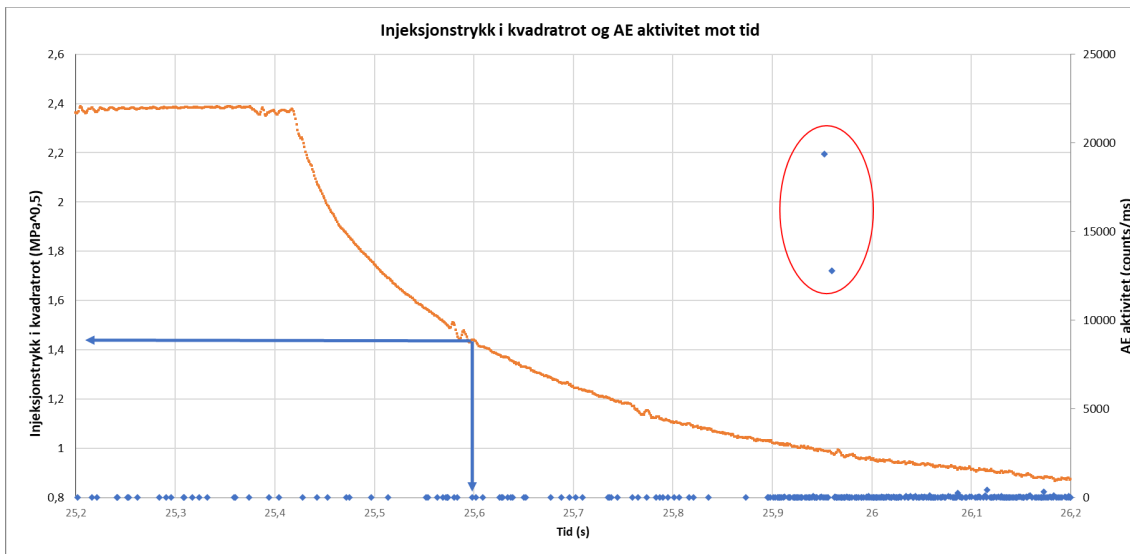
Testforsøkets fullstendige gjennomgang med injeksjonstrykk og AE aktivitet er vist i **fig. 6.28**. Testens første jekkerunde er gjennomgått i **fig. 6.29**, **6.30** og **6.31**. Grafiske plott av resterende jekkesykluser er vist i vedlegg **I.2**.



Figur 6.29: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte av injeksjonstrykk under flowback av første jekkesyklus i testnummer 20200309140146. Endring i den derivertes stigning er vist med to røde linjer som krysser hverandre. Linjenes krysningspunkt er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.



Figur 6.30: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte av injeksjonstrykk under flowback av første jekkesyklus i testnummer 20200309140146. En endring i kvadratrotplottet av injeksjonstrykket er her tolket med to svarte linjer. Krysningspunktet for de svarte linjene er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.



Figur 6.31: Trykk og AE aktivitet under flowback fasen for første pumperunde under test 20200309140146. Distinkt AE aktivitet ved 25,9 sekund, markert med rød ring. De blå linjene viser den tidligere tolkningen av shut-in trykket i 6.29.

Tilsvarende grafer for de to siste jekkingene under testforsøket er vist i vedleggsliste I.2. Jekkingene viser en forsinket trend med AE aktivitet under flowback. Likevel er AE aktiviteten svært kraftig med en maksimal count rate på rundt 20000 counts per millisekund for alle flowback-perioder. Dette inntreffer når injeksjonstrykket befinner seg på 1 MPa. En fullstendig oversikt av tolkede resultat og avvik fra normalspenning er satt opp i tabell 6.5. Tabellen viser at P_s er underestimert for alle metoder i forhold til forventningen om et shut-in trykk på 2,5 MPa.

Tabell 6.5: Tabellen viser en oversikt over estimerte verdier for shut-in trykket under testnummer 20200309140146

Estimerte verdier for shut-in trykk, flowback-test 20200309140146			
Trykksyklus	Tolkningstype	Estimert P_s (MPa)	Avvik fra utregnet normalspenning ($P_s - \sigma_n$)
Første jekking	AE aktivitet	1	-1,5
Andre jekking	AE aktivitet	1	-1,5
Tredje jekking	AE aktivitet	1	-1,5
Første jekking	$\frac{dP}{dt}$ mot tid	2,1	-0,4
Andre jekking	$\frac{dP}{dt}$ mot tid	1,7	-0,8
Tredje jekking	$\frac{dP}{dt}$ mot tid	1,6	-0,9
Første jekking	\sqrt{P} mot tid	1,7	-0,8
Andre jekking	\sqrt{P} mot tid	1,7	-0,8
Tredje jekking	\sqrt{P} mot tid	2	-0,5

6.4 Vurdering av stegvis jekketester

I dette delkapittelet er to stegvise jekketester presentert med data av akustisk emisjon, pumperate og injeksjonstrykk. .

Som beskrevet i delkapittel 3.5 kan åpning og lukking av sprekk under en stegvis jekketest tolkes ut ifra endring av vanntap i testen. En sammenlikning av vanntapsmåling mot trykk over tid er derfor utført. Den grafiske sammenlikningen er inspirert av prinsippet om dilatans av vanntap under sprekkåpning fra Houlsby (1976) (se kategori C i vedlegg A). Videre er en bilinear tolkning av pumperate mot trykk gjennomført for å estimere verdien for shut-in trykket P_s , en metode beskrevet i Haimson og Cornet (2003). Til slutt er AE aktiviteten grafisk plottet opp mot trykk over tid, representert av parameteren count rate (antall AE pulser per millisekund).

Målet for vanntap er i denne sammenhengen relativ, og definert som pumperate q (mL/min) delt på trykk P (MPa). Grunnlaget for definisjonen ligger i likningen for Lugeon-verdien, som vanligvis brukes til å beregne vanntap. Likningen beskriver Lugeon-verdien som lineær proporsjonal med flowrate delt på trykk (se delkapittel 3.5, side 17). Siden dette studiet er interessert i endring av vanntap under testing, ikke selve Lugeon-verdien, er pumperate delt på trykk benyttet som en alternativ parameter. I resultatene presentert i dette delkapittelet er denne parameteren benevnet som *relativt vanntap*. Direkte måling av lugeon-verdi er ikke mulig på grunn av ulik pakkerløsning fra vanlig lugeon-testing og

ukjent lengde av testseksjonen i borhullet.

Det er viktig å belyse at forsøkene er utført uten en direkte flowmåler. Pumperate er brukt som en erstatning, der raten er målt direkte ut ifra stempelpumpen. Friksjonstapet i injeksjonslinjen fram til prøvestykket er derfor ikke tatt hensyn til.

6.4.1 Stegvis jekketest 1

Stegvis jekketest 1 er oppført som testnummer **20200429123555**, med følgende hovedspenninger:

- σ_H i nord-sør retning: 6 MPa
- σ_h i øst-vest retning: 2 MPa
- σ_v vertikalt: 3 MPa

Testen er en jekketest av en eksisterende sprekk. Testen er utført på ID.004, der sprekkenummeret i forsøket er 401. Stigning og synkning av trykket er satt til 0,5 MPa, med over ett minutt mellomrom.

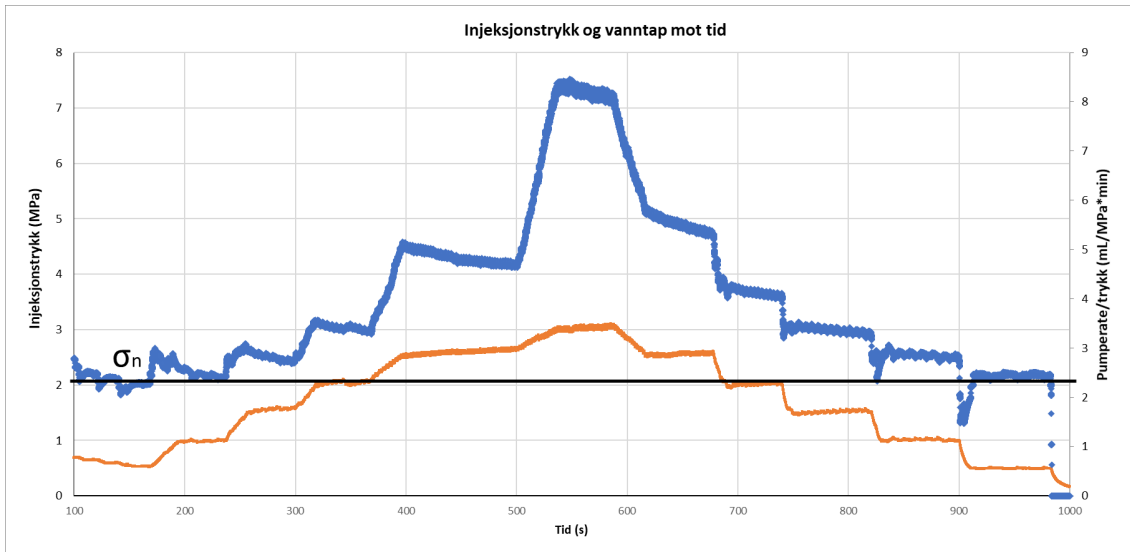
Gitt hovedspenningene, fall og fallretningen til sprekk 401, er sprekkenormalspenning σ_n beregnet til å være på **2.1 MPa**. Dermed forventes lukking av sprekk å inntreffe på 2.1 MPa.

Fig. 6.32 viser grafiske plott av trykk og relativt vanntap mot tid. Trykk er representert i oransje farge, mens vanntap er representert i blått. Plottet viser en kraftig økning i vanntap fra trykkøkningen fra 2 til 2,5 MPa rundt 400 sekund. Trykknedgangen viser en samsvarende nedgang i vanntap, også etter forventet lukking av sprekk på 2,1 MPa. Det relative vanntapet ved start og slutt av test er tilnærmet lik.

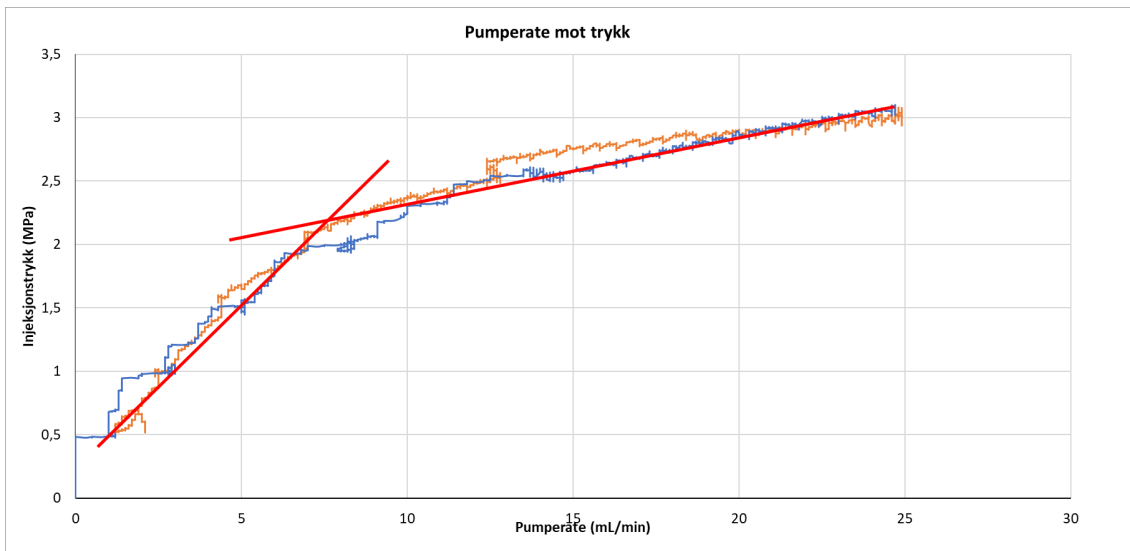
En bilinear tolkning av testen er vist i **fig. 6.33**. Plottet viser to klare lineære mønstre som møtes ved 2,2 MPa. Oransje plott for trykkøkning og blå plott for trykksenkning viser tilnærmet samme trend.

AE aktiviteten er illustrert i **fig. 6.34**, der tre distinkte faser i AE aktivitet er observert. Før åpning av sprekk, markert i svart, er aktiviteten tilsynelatende svært liten. Under åpning av sprekk, markert i rødt, inntreffer en økning i AE aktivitet som er sterkest for det høyeste injeksjonstrykket. Lukking av sprekk er tolket i starten av grønt markert område. Her vises en tydelig respons i AE for hver stegvise nedgang i injeksjonstrykk, helt ned til 0 MPa. Count raten er likevel svært liten for hele testen med en maksverdi på 140 counts per millisekund. Den svake AE aktiviteten illustreres og av få AE events under testforsøket, vist i **fig. 6.35**.

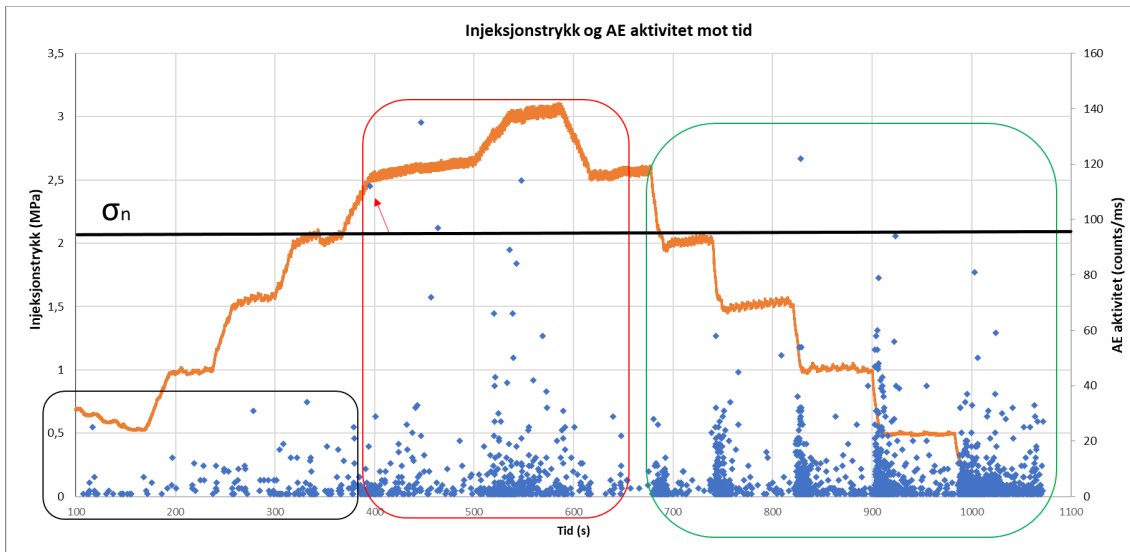
En fullstendig oversikt av tolkede estimat for P_s og avvik fra normalspenning er satt opp i tabell **6.6**.



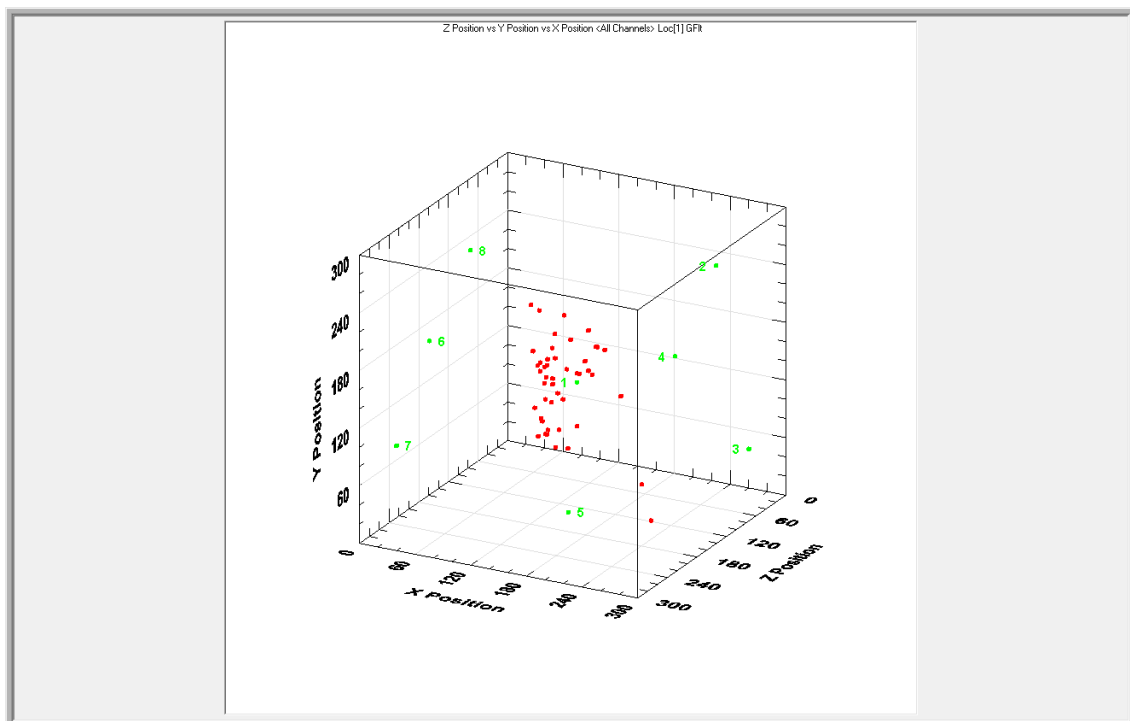
Figur 6.32: Trykk og vanntapsmåling mot tid under test 20200429123555. Beregnet normalspenning av sprekk 401 er vist i svart linje.



Figur 6.33: Trykk mot pumperate for stegvis jekketest 20200429123555. Oransje plottdata viser trykk mot pumperate under stegvis økning av injeksjonstrykk. Blå plottdata viser samme forhold under den stegvise senkingen. To lineære mønstre for den stegvise trykksenkningen er vist med røde linjer, der krysningen er tolket som shut-in trykket P_s ved lukking av sprekk.



Figur 6.34: AE aktivitet og trykk over tid for stegvis jekketest 20200429123555. AE aktiviteten er tolket å opptre i tre ulike faser, markert i svart, rød og grønne bokser. Normalspenningen til sprekk 401 er markert i svart linje.



Figur 6.35: 3D plott av AE events under testforsøk 20200429123555.

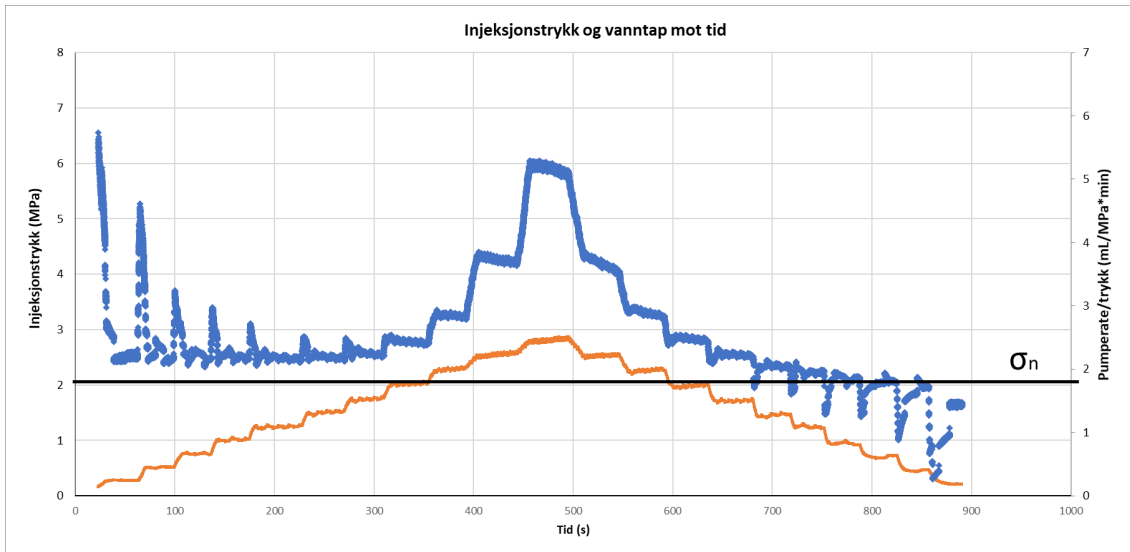
Tabell 6.6: Tabellen viser en oversikt over estimerte verdier for shut-in trykket under testnummer 2020042912355

Estimerte verdier for shut-in trykk, stegvis jekketest 2020042912355		
Tolkningstype	Estimert P_s (MPa)	Avvik fra utregnet normalspenning ($P_s - \sigma_n$)
AE aktivitet	2,5 (svakt grunnlag)	0.4 (svakt grunnlag)
Vanntap over tid	Ingen klar tolkning	Ingen klar tolkning
Trykk mot pumpe-rate	2,2	0.1

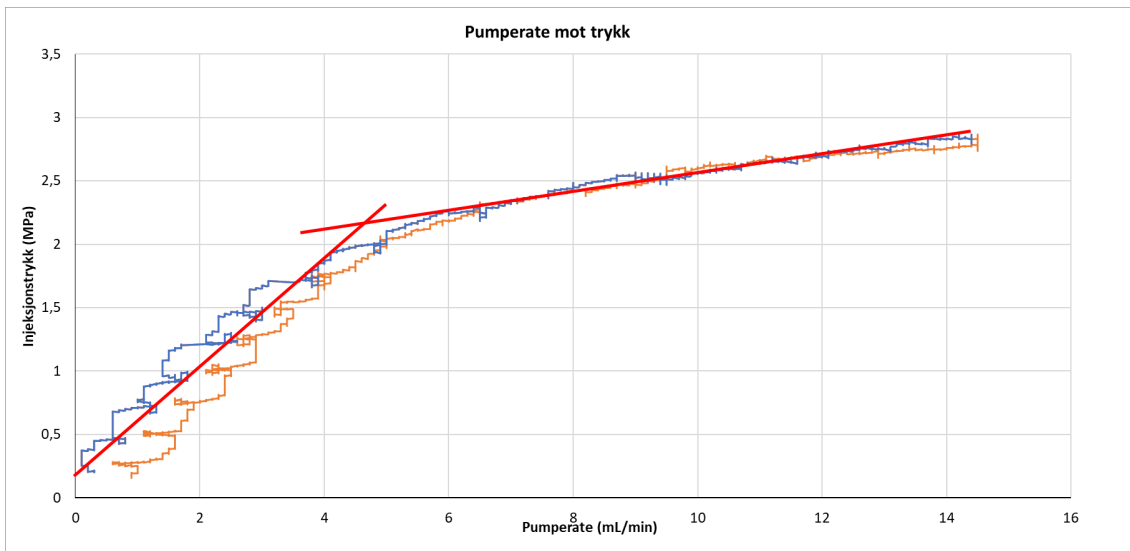
6.4.2 Stegvis jekketest 2

Stegvis jekketest 2 er oppført som testnummer **20200429131909**. Testen har akkurat samme initielle betingelser som stegvis jekketest 1. Unntaket er den stegvise økningen/senkingen av injeksjonstrykket, som for stegvis jekketest 2 er redusert til 0,25 MPa.

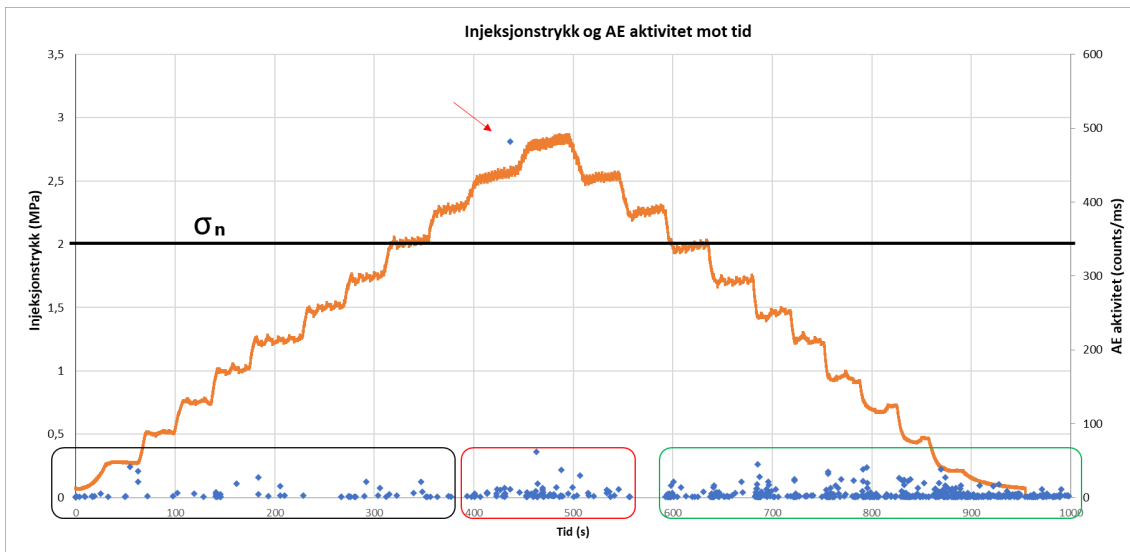
De grafiske plottene er representert på samme måte som under stegvis jekketest 1. **Fig. 6.36** viser relativt vanntap og trykk over tid. En viktig observasjon fra figuren er forskjellen i vanntapet fra startpunkt kontra sluttspunkt av testforsøket. Dataene tilsier at vanntapet ved testens slutt er mindre enn ved teststart, selv om injeksjonstrykket er på likt nivå. **Fig. 6.37** og **6.38** viser grafene av henholdsvis injeksjonstrykk mot pumpe-rate og AE aktivitet over tid. Trendene fra de to figurene samsvarer med hva som er observert for stegvis jekketest 1. AE aktiviteten er svært lav med få events, vist i **fig. 6.39**



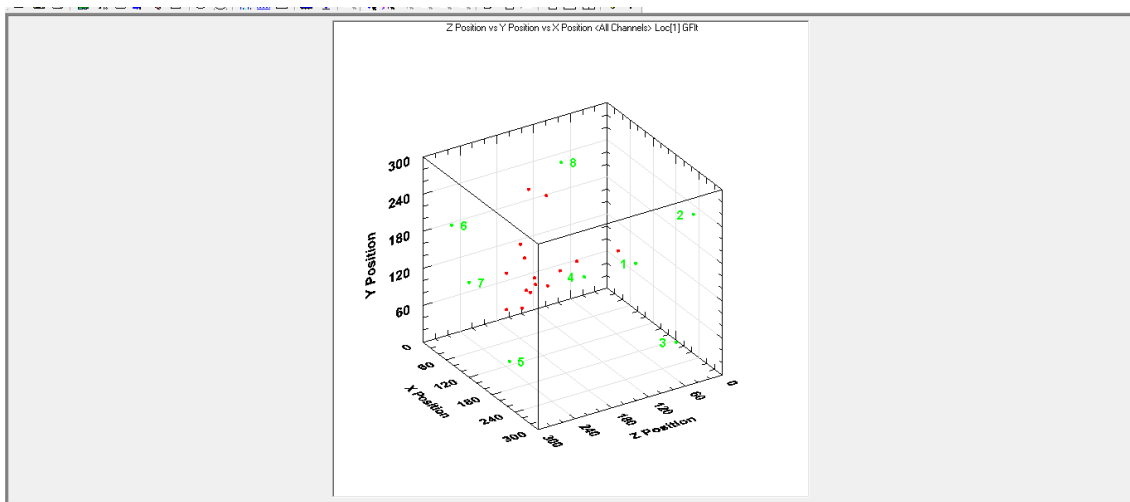
Figur 6.36: Måling av trykk og relativt vanntap mot tid under test 20200429131909. Beregnet normalspenning av sprekk 401 er vist i svart linje.



Figur 6.37: Trykk mot pumperate for stegvis jekketest 20200429131909. Oransje plottdata viser trykk mot pumperate under stegvis økning av injeksjonstrykk. Blå plottdata viser samme forhold under den stegvise senkingen. To lineære mønstre for den stegvise trykksenkingen er vist med røde linjer, der kryssingen er tolket som shut-in trykket P_s ved lukking av sprekk.



Figur 6.38: AE aktivitet og trykk over tid for stegvis jekketest 20200429131909. AE aktiviteten er tolket å opptre i tre ulike faser, markert i svart, rød og grønne bokser. Normalspenningen til sprekk 401 er markert i svart linje.



Figur 6.39: 3D plott av AE events under testforsøk 20200429131909.

Tabell 6.7: Tabellen viser en oversikt over estimerte verdier for shut-in trykket under testnummer 20200429131909

Estimerte verdier for shut-in trykk, stegvis jekketest 20200429131909		
Tolkningstype	Estimert P_s (MPa)	Avvik fra utregnet normalspenning ($P_s - \sigma_n$)
AE aktivitet	2,25 (svakt grunnlag)	0,15 (svakt grunnlag)
Vanntap over tid	Ingen klar tolkning	Ingen klar tolkning
Trykk mot pumpe-rate	2,2	0.1

En fullstendig oversikt av tolkede estimat for P_s og avvik fra normalspenning er satt opp i tabell 6.7.

Diskusjon

De utførte vurderingene av sprekkegeometri har blitt forsterket ved bruk av Akustiske emisjonsmålinger. Videre har ulike tolkninger for testmetoder vist seg å gi ulike estimat for shut-in trykket. Initielle betingelser i forsøkene har vist både likhetstrekk og variasjon i tolkningen av sprekkelukking. I dette delkapitlet vil påliteligheten bak de tre testmetodene benyttet, lukking ved shut-in, lukking ved flowback og stegvis jekking, bli diskutert. Ulike grunnlag for usikkerhet knyttet til laboratorieforsøkene og tolkningsmetoder vil bli kartlagt. Avslutningsvis er akustisk emisjon som målemetode diskutert med hensyn på valg av parametre og korrelasjon med forventninger.

7.1 Avvik i shut-in testing

Under begge gjennomganger for shut-in tester er avvik fra forventning observert i målingene av shut-in trykk (se tabell **6.2** og **6.3**). Analysen av det lineære forløpet til $\frac{dt}{dP}$ mot P , som er foreslått i ISRM standarden (Haimson og Cornet 2003), viser en klar overestimering av P_S . Dette gjelder særlig for shut-in test 2, der estimert P_S har et positivt avvik fra normalspenning på 2,3-2,5 MPa. Det eksisterer likevel et kort lineært forhold for startfasen under shut-in for begge tester (se **fig. 6.18** og **6.22**, røde linjer).

Videre vises det liten AE aktivitet under lukking i shut-in test 1 (**fig. 6.17**), og totalt fra-verende aktivitet i test 2 (**fig. 6.21**). Selv om AE aktiviteten for test 1 kan tolkes gir den fortsatt et overestimat for forventet lukking av sprekk (se tabell **6.2**). Count raten er her svært svak og det derfor mulig at signalene er av støy istedet for en reell mikroseismisk kilde.

En mulig forklaring på overestimering av sprekkelukking under shut-in testen ligger i randbetingelsene for laboratorieprøvene. Når prøven sprekker opp kan vannlekkasje vann ut av en prøve kunne forekomme. Dette kan enkelt ses i fuktmerker på prøvenes sprekkeoverflate, illustrert med bilder i vedleggsliste **G**. Fra delkapittel 3.4 er det nevnt at under en gyldig analyse av shut-in tester skal lekkasje av vann kun foregå fra sprekk til bergartspor. I det

tilfelle lekkasje foregår ut av prøveområde, tilføyer lekkasjen et ekstra ledd i massebalansen som ikke er mulig å måle.

Den ekstra lekkasjefaktoren kompliserer dermed tolkningen av shut-in fasen, og kan forstyrre den lineære massebalansen som skal opptre før lukking av sprekk. En slik tolkning stemmer overens med overestimeringen av P_s , der linearitet i $\frac{dt}{dP}$ mot P forsvinner tidligere enn forventet under shut-in. Overestimeringen av P_s kan dermed begrunnes som en feilestimering med årsak i vannlekkasje.

7.2 Erfaringer med flowback metode

I analyse av flowback-forsøkene under lukking av sprekk er en generell underestimering av P_s registrert i begge presenterte tester (se tabell 6.4 og 6.5).

Dette gjelder spesielt i tolkning av sprekkelukking fra AE aktivitet. For begge tester inntreffer en respons i AE aktivitet der injeksjonstrykket er 1,5 - 1,8 MPa lavere enn beregnet normalspenning. Avviket virker å være stabilt for begge tester. Styrken i AE aktiviteten som opptrer under lukking av flowback (fig. 6.27 og fig. 6.31) er vesentlig sterkere enn hva som er observert i tester av shut-in og stegvis jekking. Den sterke responsen gir grunnlag for at mikroseismisk aktivitet i sprekk inntreffer under lukking.

Spørsmålet som dermed oppstår er hvorfor den seismiske aktiviteten opptrer etter forventet lukking. En tolkning er at mikroseismiske brudd med utgangspunkt i sprekkelukking oppstår som resultat av skjærbrudd og ikke direkte av kompresjonen ved lukking. Fra tidligere forskning er det vist at skjærbrudd er bruddtypen som dominerer i akustisk emisjonstesting av hydraulisk splitting og jekking (Damani et al. 2018). Skjærbruddene skjer dermed i etterkant av sprekkelukking, når normalspenningen overgår injeksjonsspenningen med som tidligere nevnt 1,5 til 2 MPa. I sammenheng med andre seismiske hendelser gir en slik tolkning mening. For eksempel oppstår regionale jordskjelv når tektoniske spenninger blir bygget opp over tid, til de til slutt blir sterke nok til å overgå skjærstyrken ved skjelvets hyposenter (Grosse og Ohtsu 2008). Kilden for AE aktiviteten ved lukking under flowback må dermed betraktes som brudd i sprekkeplanet etter lukking, og ikke som en seismisk hendelse fra selve lukkingen. Faktumet at AE aktiviteten heller ikke korrelerer med de andre metodene for estimering av P_s i tabell 6.4 og 6.5 forsterker denne påstanden.

Sammenliknet med hverandre er AE aktiviteten i flowback test 2 mye sterkere enn i test 1. Grunnen til dette kan ligge i de initielle betingelsene. Test 2 har en større pumpehastighet enn test 1, og har mye større grad av anisotropi i hovedspenningene. Hovedspenningen som inntreffer parallelt med sprekkeplanet i test 2 er styrt til 10 MPa, som gir grunnlag for en stor skjærspenning i sprekkeplanet. Den store skjærspenningen kan dermed resultere i større skjærbrudd og følgende seismisk aktivitet.

Analysen av injeksjonstrykket under flowback har vist seg å samsvare nært med det forventede shut-in trykket. Både under tolkning av kvadratrot og den tidsderiverte av injek-

sjonstrykk mot tid er alle avvik estimert til under 1 MPa. Det eksisterer likevel en underestimert fra den beregnede normalspenningen i sprekk. Et svært viktig punkt å nevne her hvordan de grafiske plottene av \sqrt{P} og $\frac{dP}{dt}$ avviker fra hva eksisterende forskning viser. Sammenliknes resultatet for den tidsderiverte i test 1 (**fig. 6.27**) med Raaen et al. (2001) sin modell for den deriverte i **fig. 3.12**, er det liten sammenheng å finne mellom grafene. Ut ifra Raaen sin modell skal fasen for sprekkelukking gi en tydelig nedgang i den deriverte under sprekkelukking. I de presenterte resultatene fra flowbackforsøk er det kun en reduksjon av stigningstallet i den deriverte som kan sammenliknes. Stigningstallet er likevel positiv for alle resultater. En liknende motsetning er observert i tolkningen av kvadratrot. Der Gederaas et al. (2009) viser en konveks knekk i kvadratrot-plottet (**fig. 3.14**), viser resultatene i dette laboratorie-studiet en konkav utflating i \sqrt{P} over tid (se **fig. 6.26**).

I sine studier forklarer Raaen et al. (2001) at trykket under flowback fasen påvirkes to faktorer; endring i sprekkensystemets stivhet og vannlekkasjen ut av testområdet. Dette er to mekanismer som motvirker hverandre i trykkresponsen. Gitt at laboratorieforsøkene har en høy grad av vannlekkasje ut av testområdet, kan dette være forklaringen på hvorfor resultatene i dette studiet skiller seg ut fra tidligere forskning. Det er likevel ikke en begrunnelse for å avvise estimatene for P_s ved bruk av $\frac{dp}{dT}$ og \sqrt{P} , fordi plottene viser tydelige endringer i nærhet av det trykkområdet sprekkelukking forventes.

7.3 Erfaringer med stegvis jekketesting

Totalt sett viser resultatene fra testing med stegvis jekking den beste sammenhengen med den beregnede normalspenningen. I tolkningen av trykk mot pumperate i tabell **6.6** og **6.7** er avviket minimalt med tanke på forventet P_s . En sterk dilatans i vanntapsmåling har blitt observert for begge tester der injeksjonstrykket ligger over beregnet normalspenning. Resultatet samsvarer her godt med Houlsby (1976) sine studier, og bekrefter i stor grad at jekking av sprekk inntreffer der det forventes.

Det er likevel registrert forskjeller i vanntapsmålingene når det gjelder økning og senking av injeksjonstrykk. under økning viser vanntapet en distinkt forskjell før og etter tolket åpning av sprekk. En slik distinkt forskjell er vanskeligere å finne under lukking av sprekk. Samtidig viser vanntapsmålingene i **fig. 6.36** mindre vanntap ved testslutt enn teststart. Årsaken til dette er ukjent, men en mulig forklaring kan være at injeksjonsvannet bevares i stor grad etter trykktopp, og at det ikke skal mye mer vannpumping til for å holde på injeksjonstrykket. Det er viktig å huske på at pumperaten stempelpumpen styrer vanntaps-parameteren her og ikke et flow-meter. Dermed er vanntapsmålingen indirekte og viser ikke til det reelle volumetriske vanntapet.

Den bilineære tolkningen av trykk mot pumperate viser at to ulike lineære regimer eksisterer før og etter den beregnede normalspenningen til sprekk. Sammenliknet med data fra Lee og Haimson (1989) (se **fig. 3.8**) har resultatene presentert med **fig. 6.33** og **fig. 6.37** tydelig slakere lineær linje under lavt trykk. Observasjonen er en tydelig indikasjon på at vannlekkasje ut av prøvestykket også opptrer før åpning av sprekk. Lekkasken forsterkes

så når sprekken åpnes, som gir en enda slakere linje ved høyere trykk.

Akustisk emisjon har vist seg å skape lite respons under stegvis jekking av sprekke. Et tydelig mønster etter forventet sprekkelukking er likevel å finne for begge testforsøk (se **fig. 6.34** og **fig. 6.34**). Count raten er derimot liten og øker i intensitet jo lavere trykket senkes. Det er dermed grunnlag for å tro at count raten i dette tilfelle skyldes støy fra bevegelse i stålplatene og ikke direkte seismiske kilder i prøvestykket.

7.4 Bruk av AE events

Resultatene fra sprekkkartleggingen viser at akustiske emisjonsmålinger korrelerer med den observerte sprekkgeometrien. Både 3D plott og 2D plott fra AE events satt opp mot bilder i samme tverrsnitt viser en tydelig korrelasjon (se delkapittel 6.1 og vedleggsliste **G**). Korrelasjonen bekrefter at sprekkaktivitet er hovedkilden til AE aktivitet internt i prøvestykket.

I initialbetingelsene for definering av AE events ble hastigheten alle prøvematerialer satt til 3800 meter per sekund. Fra P-bølge hastighetsmålingene i vedlegg **C**, er det kjent at hastigheten i realiteten varierer for hver enkelt bergartsprøve og i prøvenes ulike retninger. At 3D og 2D plottene likevel viser en god korrelasjon, tyder på at event-lokaliseringen ikke er sensitiv for variasjoner i P-bølge hastighet. Likevel er det viktig å understreke at en justering av initiell hastighet ut ifra P-bølge målinger kunne ha gitt en bedre korrelasjon enn hva de eksisterende dataene viser.

Det stilles spørsmål til hvor godt count raten som parameter for AE aktivitet i utgangspunktet er. Som registrert i målinger for shut-in testing og stegvis jekketesting kan mye av count raten bli tolket som støy og ikke direkte seismiske kilder fra sprekkaktivitet. En løsning på problemet er å direkte bruke en event rate som et mål på aktiviteten. En event rate vil muliggjøre fullstendig filtrering av støy utenfor prøvestykket, og detektere de reelle seismiske kildene i prøven. Fargelegging av AE events i grafiske plott i form av tid, som utført av Stanchits et al. (2014), kan videre koble event raten i tid opp mot geometriske plott. En ulempe som derimot kan opptre er at energien i de ulike seismiske kildene ikke forskjelliggjøres med en event rate.

7.5 Normalspenninger og sprekkarakter

I denne oppgaven er normalspenningen for hver enkelt sprekke beregnet ut ifra antagelsen om lineære sprekkplan. Fra bilder og grafiske plott fra AE events er det påvist at dette i stor grad ikke er tilfellet, vist med resultatene i delkapittel 6.1 og vedleggsliste **G**. Spesielt gjelder det sprekkenummer 201 i ID 002 og sprekkeplanene i ID 003, som viser stor grad av kurving og variasjon i prøvestykket. Det er dermed usikkerhet knyttet til hvor nøyaktig beregningen av sprekkenes normalspenning stemmer overens med virkeligheten. Et varierende sprekkplan vil kunne gi varierende normalspenning, spesielt med høy anisotropi i hovedspenningene. Med en varierende normalspenning kan tolkningen av shut-in trykket

opptre mer kompleks enn hva som er forventet, ettersom flere normalspenninger fører til flere separate lukninger av sprekken i samme test. Dette kan være en del av årsaken bak avvikene i estimering av P_s .

Det er likevel bekreftet i stor grad at hydraulisk splitting og jekking av sprekk forekommer normalt på minste hovedspenning. Selv i testene av ID 003, der tre sprekkeplan eksisterer i samme prøve, viser det seg at kun sprekkeplanet normalt på minste hovedspenning gir utslag i AE dataene. Dette er observert særlig godt i 3D plottet av sprekkenummer 303. Her viser data fra AE events (**fig. 6.12**) at mikroseismisk aktivitet foregår normalt på vertikalen, som i dette tilfellet er minste hovedspenning. Dette skjer til tross for at både sprekk 301 og 302 er utviklet på dette tidspunktet. Et stort unntak fra bekræftelsen er observert i sprekkenummer 201 (**fig. 6.5**), der sprekkeplanet er utviklet skrått på minste hovedspenning. Avviket i sprekk 201 kan komme av anisotropiske effekter i bergartsprøven, men ingen slik effekt er blitt direkte observert i ID 002 tilknyttet sprekkegeometrien.

Konklusjon

I denne masteroppgaven er utvalgte metoder for detektering av minste hovedspenning utført med en forenklet variant av hydraulisk splitte- og jekketesting. Testforsøkene er utført i laboratorie og studert i detalj gjennom bruk av akustiske emisjonsmålinger og injeksjonsdata. Kvalitative vurderinger av geometrien i induuerte sprekker har blitt vurdert ut ifra akustiske emisjonsmålinger og bilder av prøvestykkene. De viktigste resultatene av de presenterte laboratoriearbeidene er:

- Akustisk emisjon kan korrekt detektere sprekeaktivitet i romlige dimensjoner som følge av hydraulisk splitte og jekkeforsøk. De akustiske dataene bidrar dermed til ekstra informasjon om sprekegeometrien som ikke kan detekteres med egne øyne.
- Mikroseismisk aktivitet under lukking av jekket sprekk er kun signifikant ved bruk av flowback metoden. For shut-in metode og stegvis jekketesting er responsen minimal og tolket som støy. Signifikant AE aktivitet korrelerer ikke tidsmessig med det forventede shut-in trykket, og er heller relatert til skjærbrudd etter lukking av sprekk. Bruk av count rate som et mål på AE aktivitet viser respons under testing men greier ikke å skape et klart skille mellom støy og reell seismisk aktivitet.
- Laboratorietester med bruk av standardisert shut-in prosedyre fungerer ikke som tolkningsmetode for shut-in trykket P_s , på grunn av stor vannlekkasje ut av prøven. Flowback-metoden viser og store avvik fra tidligere forskning som kan knyttes opp mot effekten av vannlekkasje. Detaljerte trykkanalyser av flowback gir likevel lovende resultat for estimering av injeksjonstrykket ved sprekkelukking. Det er derimot stegvis jekking av sprekk som generelt peker seg ut som den mest pålitelige metoden i måling av P_s . Vannlekkasje er påvist under forsøkene her og, men har en mindre innvirkning på den endelige tolkningen.
- Orienteringen i sprekeplanet som oppstår av hydraulisk splitting er i hovedsak normalt rettet på minste hovedspenning. Dette gjelder også i tilfeller der eksisterende sprekker med ugunstig orientering opptrer i prøvestykket. Det er likevel vist at sprekken ikke opptrer som perfekte lineære plan og er kurvet i noen tilfeller. Dette

bidrar til en usikkerhet i beregnet normalspenning og kan ha påvirket estimatene av P_s .

8.1 Videre arbeid

Usikkerhetene og begrensningene knyttet til resultatene i denne masteroppgaven er i stor grad påvirket av laboratorieforsøkens initielle betingelser. For å kunne redusere omfanget av usikkerhet bør metodene overføres til feltforsøk og bli utsatt for mer variasjon i initielle betingelser. Følgende arbeider vil derfor være bidragsytende framover:

- Utføring av feltmålinger for alle hydrauliske testmetoder. En sammenlikning av vannlekkasjer fra feltmålinger med eksisterende laboratoriearbeid vil være viktig i å avkrefte eller bekrefte kildene for avvik i eksisterende testresultat.
- Erstatte bruk av count rate med event rate i målinger av akustisk emisjon. Dette gjelder da særlig videre laboratoriearbeid i studiet av sprekkelukking. Forsinkelsen i AE aktivitet under flowback bør kartlegges grundigere forstå den mikroseismiske aktiviteten som oppstår.
- Med grunnlag i punktskyen som måles for akustiske events kan komplekse sprekkeplan kartlegges bedre i testforsøkene. Dette kan videre brukes i en numerisk analyse av åpning og lukking av jekkede sprekker. Dermed kan usikkerheten rundt variasjon i normalspenning bekrefte eller avkreftes for testforsøk.
- Flere testforsøk med avvik fra vanlig sprekkegeometri og spenningsforhold bør undersøkes nærmere. Dette er spesielt interessant for laboratorieforsøk hvor slike avvik kan lages i forkant av testforsøk.

Utførelse av punktene presentert her vil bidra til et bedre fundament for standardisering av enkle hydrauliske jekketester. Nyere utvikling innenfor numerisk modellering av hydrauliske metoder vil være nyttig å ta med i betrakning for fremtidig arbeid.

Referanser

- Benson, R. (1989), 'Design of unlined and lined pressure tunnels', *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research* **4**(2), 155–170.
- Brekke, T. L. og Ripley, B. (1987), Design guidelines for pressure tunnels and shafts, Technical report, California Univ., Berkeley (USA). Dept. of Civil Engineering; Electric Power
- Broch, E. (1984), *Development of unlined pressure shafts and tunnels in Norway*, Pergamon Press, S.I.
- Bryhni, I. og Askheim, S. (2020), 'Iddefjordsgranitt i Store norske leksikon på snl.no', Hentet 09.06.2020 fra <https://snl.no/iddefjordsgranitt>.
- Damani, A., Sondergeld, C. og Rai, C. (2018), 'Experimental investigation of in situ and injection fluid effect on hydraulic fracture mechanism using acoustic emission in tennessee sandstone', *Journal of Petroleum Science and Engineering* **171**, 315–324.
- De Bree, P. og Walters, J. (1989), 'Micro/minifrac test procedures and interpretation for in situ stress determination', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* **26**(6), 515–521.
- Gederaas, T., Raaen, A. et al. (2009), Precise minimum horizontal stress determination from pump-in/flowback tests with drilling mud, in '43rd US Rock Mechanics Symposium og 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium', American Rock Mechanics Association.
- Grosse, C. U. og Ohtsu, M. (2008), *Acoustic emission testing*, Springer Science og Business Media.
- Gundersen, A. S., Carotenuto, P., Lunne, T., Walta, A. og Sparrevik, P. M. (2019), 'Field verification tests of the newly developed flow cone tool—in-situ measurements of hydraulic soil properties', *AIMS Geosciences* **5**(4), 784–803.

-
- Haimson, B. og Cornet, F. (2003), 'Isrm suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (hf) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (htpf)', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **40**(7-8), 1011–1020.
- Hanssen, T. H. (1997), *Investigations of some rock stress measuring techniques and the stress field in Norway*, Vol. 1997:144 of *Doktor ingeniøravhandling (Trondheim : trykt utg.)*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk, Trondheim.
- Hayashi, K. og Haimson, B. C. (1991), 'Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination of in situ minimum compressive stress', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **96**(B11), 18311–18321.
- Hayashi, K. og Sakurai, I. (1989), 'Interpretation of hydraulic fracturing shut-in curves for tectonic stress measurements', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* **26**(6), 477–482.
- Houlsby, A. C. (1976), 'Routine interpretation of the lugeon water-test', *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* **9**(4), 303–313.
- Ishida, T. (2001), 'Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field', *Construction And Building Materials* **15**(5-6), 283–295.
- Ishida, T., Fujito, W., Yamashita, H., Naoi, M., Fuji, H., Suzuki, K. og Matsui, H. (2019), 'Crack expansion and fracturing mode of hydraulic refracturing from acoustic emission monitoring in a small-scale field experiment', *Rock Mechanics and Rock Engineering* **52**(2), 543–553.
- Ito, T., Evans, K., Kawai, K. og Hayashi, K. (1999), 'Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **36**(6), 811–826.
- Judd, W. R. (1964), Rock stress, rock mechanics and research, in 'State of Stress in the Earth's Crust', Elsevier New York, pp. 5–53.
- Kehle, R. O. (1964), 'The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing', *Journal of Geophysical Research* **69**(2), 259–273.
- Landrø, M. (2010), *Anvendt geofysikk, Compendium for TPG4100 - physics and geophysics*, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Lee, M. og Haimson, B. (1989), 'Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* **26**(6), 447–456.
- Li, C. C. (2018), *Rock Mechanics, Compendium for TGB 4210 - Rock mechanics, basic course*, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Liu, L., Li, L., Elsworth, D. og Yu, Y. (2018), 'The impact of oriented perforations on fracture propagation and complexity in hydraulic fracturing', *Processes* **6**(11).

-
- Lugeon, M. (1933), 'Barrages et géologie', *Bulletin technique de la Suisse romande* **58**(19-20), 225.
- Merritt, A. H. (1999), Geologic and geotechnical considerations for pressure tunnel design, in 'Geo-Engineering for Underground Facilities', ASCE, pp. 66–81.
- MISTRAS (2011), *MISTRAS user's manual SAMOS AE system*, 3 edn, MISTRAS group INC, Products and systems division, Princeton Junction, NJ, USA.
- NFF (2002), *Berginjeksjon*, Vol. nr 1 of *Håndbok (Norsk forening for fjellsprenningsteknikk)*, [rev. utg.]. edn, Norsk forening for fjellsprenningsteknikk, Oslo.
- NFF (2010), *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*, Vol. nr. 6 of *Håndbok (Norsk forening for fjellsprenningsteknikk)*, Norsk forening for fjellsprenningsteknikk, Oslo.
- Nilsen, B. og Palmström, A. (2000), 'Handbook no. 2, engineering geology and rock engineering', *Norwegian Group for Rock Mechanics (NBG)*.
- Palmstrøm, A. og Buen, B. (2017), 'Leirskred forårsaket av brudd i kraftverkstunnel', *Geo* **20**, 38–40.
- Pollock, A. A. (1989), 'Acoustic emission inspection', *Metals handbook*.
- Quiñones-Rozo, C. (2010), 'Lugeon test interpretation, revisited', *Collaborative Management of Integrated Watersheds* pp. 405–414.
- Raaen, A., Skomedal, E., Kjørholt, H., Markestad, P. og Økland, D. (2001), 'Stress determination from hydraulic fracturing tests: the system stiffness approach', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **38**(4), 529–541.
- Rancourt, A. J. og Mitri, H. (2011), 'Application of rock cover alteration ratio concept in preliminary design of unlined pressure tunnels', *Canadian geotechnical journal* **48**(11), 1674–1682.
- Rutqvist, J. og Stephansson, O. (1996), 'A cyclic hydraulic jacking test to determine the in situ stress normal to a fracture', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* **33**(7), 695–711.
- Stanchits, S., Surdi, A., Gathogo, P., Edelman, E. og Suarez-Rivera, R. (2014), 'Onset of hydraulic fracture initiation monitored by acoustic emission and volumetric deformation measurements', *Rock Mechanics and Rock Engineering* **47**(5), 1521–1532.
- Trefethen, L. N. og Bau III, D. (1997), *Numerical linear algebra*, Vol. 50, Siam.
- USGS (2019), 'Example of Seismic Waveform', Hentet 09.06.2020 fra <https://www.usgs.gov/media/images/example-seismic-waveform>.
- Yew, C. H. og Weng, X. (2014), *Mechanics of hydraulic fracturing*, Gulf Professional Publishing.

-
- Yokoyama, T., Sakaguchi, K. og Ito, T. (2017), 'Re-opening and shut-in behaviors under a large ratio of principal stresses in a hydraulic fracturing test', *Procedia Engineering* **191**, 862–868.
- Zhou, Z.-l., Zhou, J., Dong, L.-j., Cai, X., Rui, Y.-c. og Ke, C.-t. (2017), 'Experimental study on the location of an acoustic emission source considering refraction in different media', *Sci Rep* **7**(1), 7472–7472.
- Ødegaard, H., Barkved, H. og Nilsen, B. (2019), 'Om tommelfingerregler og konus-plassering i norske kraftverk', *FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK-BERGMEKANIKK-GEOTEKNIKK* **57**, 239–249.
- Ødegaard, H. og Nilsen, B. (2018), Engineering geological investigation and design of transition zones in unlined pressure tunnels, in 'ISRM International Symposium-10th Asian Rock Mechanics Symposium', International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Kategorier for Lugeon verdier under testgjennomføring (Houlsby 1976)

Vedlegget viser 5 kategorier for tolkning av trykk og Lugeon-verdier ved steg-vis Lugeon-testing.

TABLE 1: Lugeon patterns for various occurrences during testing:
Their interpretation and percentage occurrences

TEST PRESSURES (SHOWN IN APPROX. RELATIVE MAGNITUDE)	LUGEON PATTERN LUGEONS CALCULATED FOR EACH 10 MINUTE RUN (RELATIVE MAGNITUDES SHOWN IN GENERALISED PATTERNS; ACTUAL MAGNITUDES CAN VARY WIDELY)	CHARACTERISTICS OF THE PATTERN, & INTERPRETATION OF IT	WHICH OF THE LUGEON VALUES IN THE PATTERN SHOULD BE USED AS THE REPORTED PERMEABILITY?	PERCENTAGE OF ACTUAL CASES IN EACH GROUP (SUMMARISED FROM TABLE Y) WHEN THE REPORTED PERMEABILITY IS	
				1, 2, OR 3 LUGEONS	4 OR MORE LUGEONS
GROUP A - LAMINAR FLOW					
1ST TEN MINUTE RUN 2ND 3RD 4TH 5TH		ALL 5 LUGEONS ARE ABOUT EQUAL HENCE LAMINAR FLOW	USE THE AVERAGE OF THE FIVE LUGEONS (TO THE NEAREST WHOLE NUMBER)	78%	5%
GROUP B - TURBULENT FLOW					
1ST TEN MINUTE RUN 2ND 3RD 4TH 5TH		LOWEST LUGEON VALUE OCCURRING AT HIGHEST PRESSURE HENCE TURBULENT FLOW	USE THE LUGEON VALUE FOR THE HIGHEST PRESSURE	13%	53%
GROUP C - DILATION					
1ST TEN MINUTE RUN 2ND 3RD 4TH 5TH		HIGHEST LUGEON OCCURRING AT HIGHEST PRESSURE HENCE DILATION	USE THE LUGEON VALUE FOR THE LOWEST (OR MEDIUM) PRESSURES	1%	9%
GROUP D - WASH-OUT, ETC					
1ST TEN MINUTE RUN 2ND 3RD 4TH 5TH		LUGEONS INCREASING AS TEST PROCEEDS HENCE THE TEST IS CAUSING CHANGES TO THE FOUNDATION	USE THE HIGHEST LUGEON VALUE UNLESS SPECIAL REASONS REQUIRE OTHERWISE	2%	21%
GROUP E - VOID FILLING					
1ST TEN MINUTE RUN 2ND 3RD 4TH 5TH		LUGEONS DECREASING AS TEST PROCEEDS HENCE THE TEST IS GRADUALLY FILLING EXTENSIVE VOIDS	USUALLY USE THE FINAL LUGEON VALUE	6%	12%

*CALCULATED USING DIRECT PROPORTION TO RELATE TO LUGEONS "DEFINITION" PRESSURE OF 10 BARS (150 P.S.I.)

THIS TABLE GIVES GENERAL PATTERNS ONLY. DISCRETION IS NECESSARY IN ADAPTING THESE TO THE INEVITABLE VARIATIONS MET IN PRACTICE

Vedlegg **B**

Produktblad Stempelpumpe

Produktblad for stempelpumpen benyttet under laboratorieforskene

ReaXus PR Class

High-Flow Dual Head Pumps



The rugged PR Class consists of dual-headed positive displacement piston pumps that provide high accurate flows and excellent pressure capability for a variety of uses.

Designed for a wide range of Preparative and Semi-Prep Chromatography as well as SMBC applications.

REAXUS

Standard fluid path materials are Stainless Steel. Other available features include jacketed heads for temperature controlled processes.



The pumps are designed for a wide range of Preparative and Semi-Prep Chromatography as well as SMBC (simulated moving bed chromatography) and many process and industrial applications. With 100 mL/min and 300 mL/min versions reaching pressures up to 4000 psi the pumps will meet the most demanding LC and process needs.

Features include an integrated Prime-Purge Valve interactive keypad control and complete PC control and status through RS-232 and Micro USB 2.0 ports. The PR Class provides the flow rates and pressures required for high throughput separations.

FLOW RATE

100 mL/min
300 mL/min

PRESSURE

Up To 4,000 psi
(100 mL/min)

FLUID PATH

Jacketed Stainless Steel

CONTROL

RS-232, Micro USB, Run/Stop, Analog
(0-10V, 4-20mA)

PR CLASS—Specifications

Flow Rate Range and Max. Pressure Ratings*	0.01–100 mL/min (4,000 psi) 0.01–300 mL/min (1,000 psi)
Pulsation**	≤4% @ 50 mL/min and 500 psi (100 mL)
Pressure Accuracy	±2% of full scale pressure
Flow Precision	0.5% RSD
Flow Accuracy	Within 3% of set flow rate, 2.0 mL/min and above; 80:20 Water/IPA @ 1,000 psi (100 mL) Within 4% of set flow rate, 5.0 mL/min and above; 80:20 Water/IPA @ 500 psi (300 mL)
Flow Precision	0.5% RSD

Wetted Materials	(See Above Options), Synthetic Ruby, Sapphire, UHMWPE, PTFE
Dimensions	6.3" H x 10" W x 17" D (16 x 25.4 x 43.2 cm)
Weight	30 lbs. (13.6 kg)
Power	100–240 Vac (± 10%), 50–60 Hz
Control	RS-232, Micro USB, Run/Stop, Analog (0–10V, 4–20mA)

* Flow Rate is dependent on solvent selection and operating pressure.

** Pulsation value with pulse dampener.

PR CLASS—Order Numbers

CONSTANT FLOW

STAINLESS STEEL, W/TEMP JACKET

Stainless Steel Fluid Path; Temp Jacketed Head; Pressure & Leak Sensors with Pulse Dampener; Standard Seal (Stainless Steel Energizer); Constant-Flow Control Mode

0.01–100.00 mL/min; 4,000 psi # PR100JFT1XFTL

0.01–300.0 mL/min; 1,000 psi # PR300JFT1XFTL

Teledyne ISCO

P.O. Box 82531, Lincoln, Nebraska, 68501 USA
Toll-free: (800) 228-4373 • Phone: (402) 464-0231 • Fax: (402) 465-3091

teledyneisco.com



Teledyne ISCO is continually improving its products and reserves the right to change product specifications, replacement parts, schematics, and instructions without notice.



Tabell av lyd hastighetsmålinger (etter Henki Ø)

P-bølge hastigheter i E-W, N-S, og vertikal retning for alle bergartsprøver. Målinger og tabell etter Henki Ødegaard.

Sample ID	Direction	Distance (m)	Travel time (microseconds)	Sound velocity (m/s)	Snitthastighet prøveretning + kommentarer
001	E-W	0,2995	66,1	4531	
001	E-W	0,2995	64,3	4658	
001	E-W	0,2995	64,6	4636	4608
001	E-W	0,2995	60,60	4942	Etter HF (hydraulisk splitting)
001	E-W	0,2995	60,40	4959	Etter HF
001	E-W	0,2995	63,30	4731	Etter HF, målt høyt i prøve, antatt over mettet sone
001	N-S	0,3010	70,6	4263	
001	N-S	0,3010	73,1	4118	
001	N-S	0,3010	71,0	4239	4207
001	N-S	0,3010	64,90	4638	Etter HF
001	N-S	0,3010	66,20	4547	Etter HF
001	N-S	0,3010	67,20	4479	Etter HF
001	Vertical	0,2990	76,9	3888	
001	Vertical	0,2990	74,5	4013	
001	Vertical	0,2990	74,5	4013	3972
001	Vertical	0,2990	68,90	4340	Etter HF
001	Vertical	0,2990	67,70	4417	Etter HF
001	Vertical	0,2990	70,10	4265	Etter HF
002	EW 3-1	0,3010	71,40	4216	
002	EW 9-7	0,3010	70,10	4294	
002	EW 1-3	0,3010	71,60	4204	
002	EW 7-9	0,3010	72,30	4163	4219
002	NS 1-7	0,2995	79,00	3791	
002	NS 9-3	0,2995	78,70	3806	
002	NS 7-1	0,2995	79,90	3748	
002	NS 3-9	0,2995	79,90	3748	3773
002	Vertical 1-7	0,2990	84,80	3526	

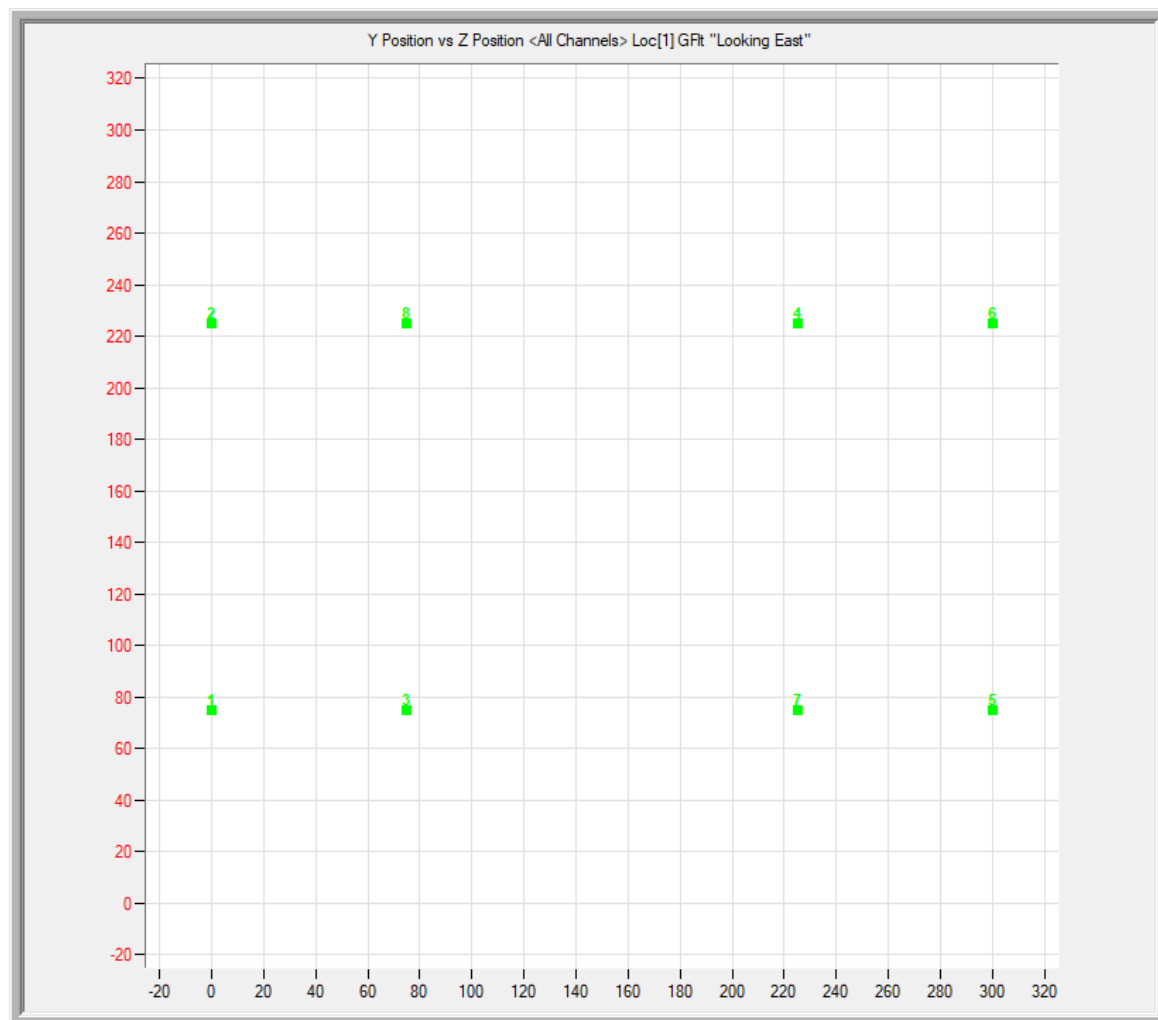
002	Vertical 3-9	0,2990	85,60	3493	
002	Vertical 7-1	0,2990	84,80	3526	
002	Vertical 9-3	0,2990	85	3518	3516
003	EW 3-1	0,2990	81,40	3673	
003	EW 9-7	0,2990	80,90	3696	
003	EW 1-3	0,2990	82,60	3620	
003	EW 7-9	0,2990	82,60	3620	3652
003	NS 1-7	0,2985	78,60	3798	
003	NS 9-3	0,2985	76,10	3922	
003	NS 7-1	0,2985	75,90	3933	
003	NS 3-9	0,2985	77,30	3862	3879
003	Vertical 1-7	0,3000	69,30	4329	
003	Vertical 3-9	0,3000	69,50	4317	
003	Vertical 7-1	0,3000	69,40	4323	
003	Vertical 9-3	0,3000	69,5	4317	4321
004	EW 3-1	0,3000	75,7	3963	
004	EW 9-7	0,3000	75,1	3995	
004	EW 1-3	0,3000	74,8	4011	
004	EW 7-9	0,3000	74,8	4011	3995
004	NS 1-7	0,3000	64,8	4630	
004	NS 9-3	0,3000	63,7	4710	
004	NS 7-1	0,3000	64,6	4644	
004	NS 3-9	0,3000	63,6	4717	4675
004	Vertical 1-7	0,3000	69,6	4310	
004	Vertical 3-9	0,3000	69,6	4310	
004	Vertical 7-1	0,3000	68,8	4360	
004	Vertical 9-3	0,3000	68,1	4405	4347

Vedlegg **D**

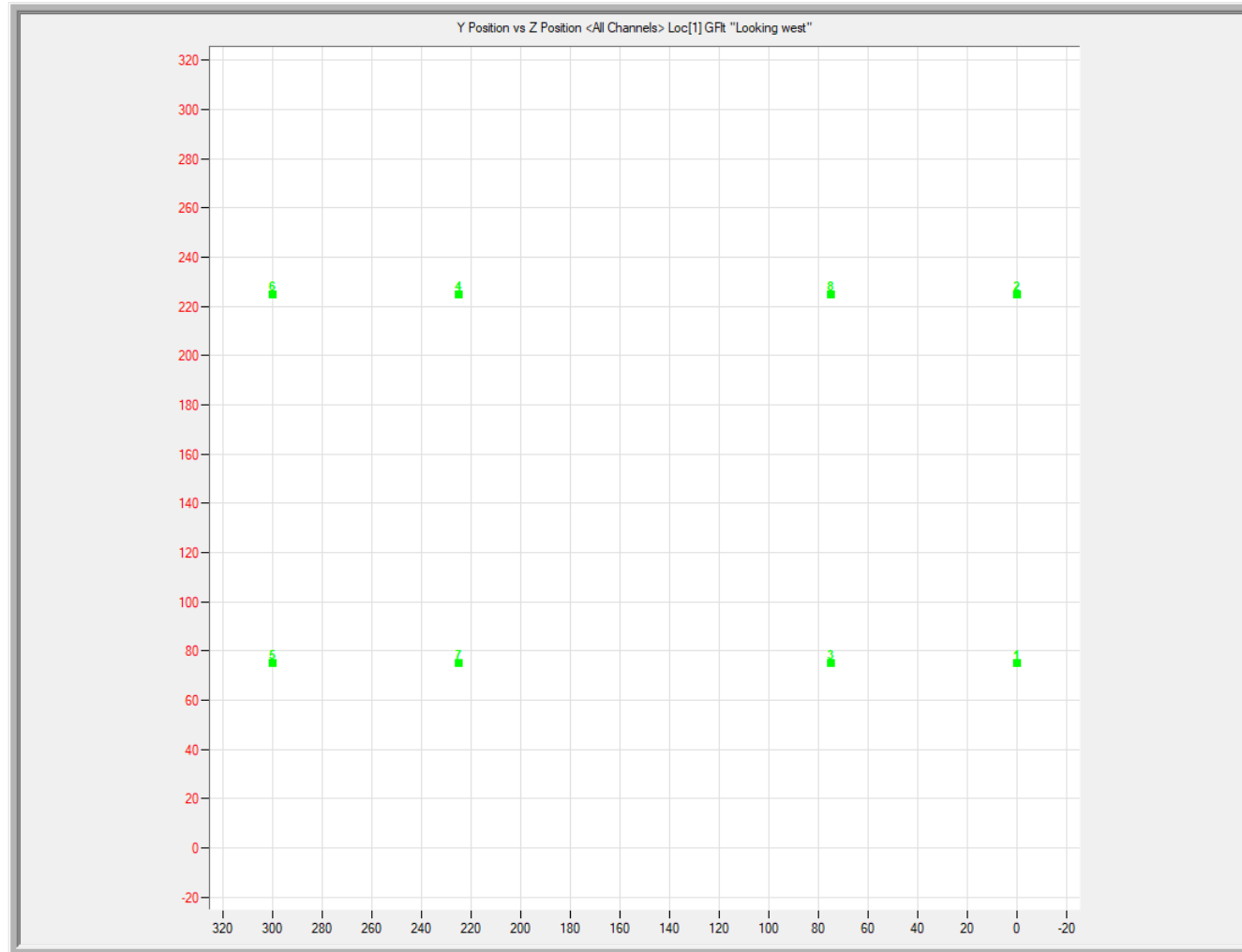
2D spredningsplott av akustisk emisjon uten data

Fire 2D spredningplott brukt for visualisering av AE event data. Sensorkanaler er nummert i grønt.

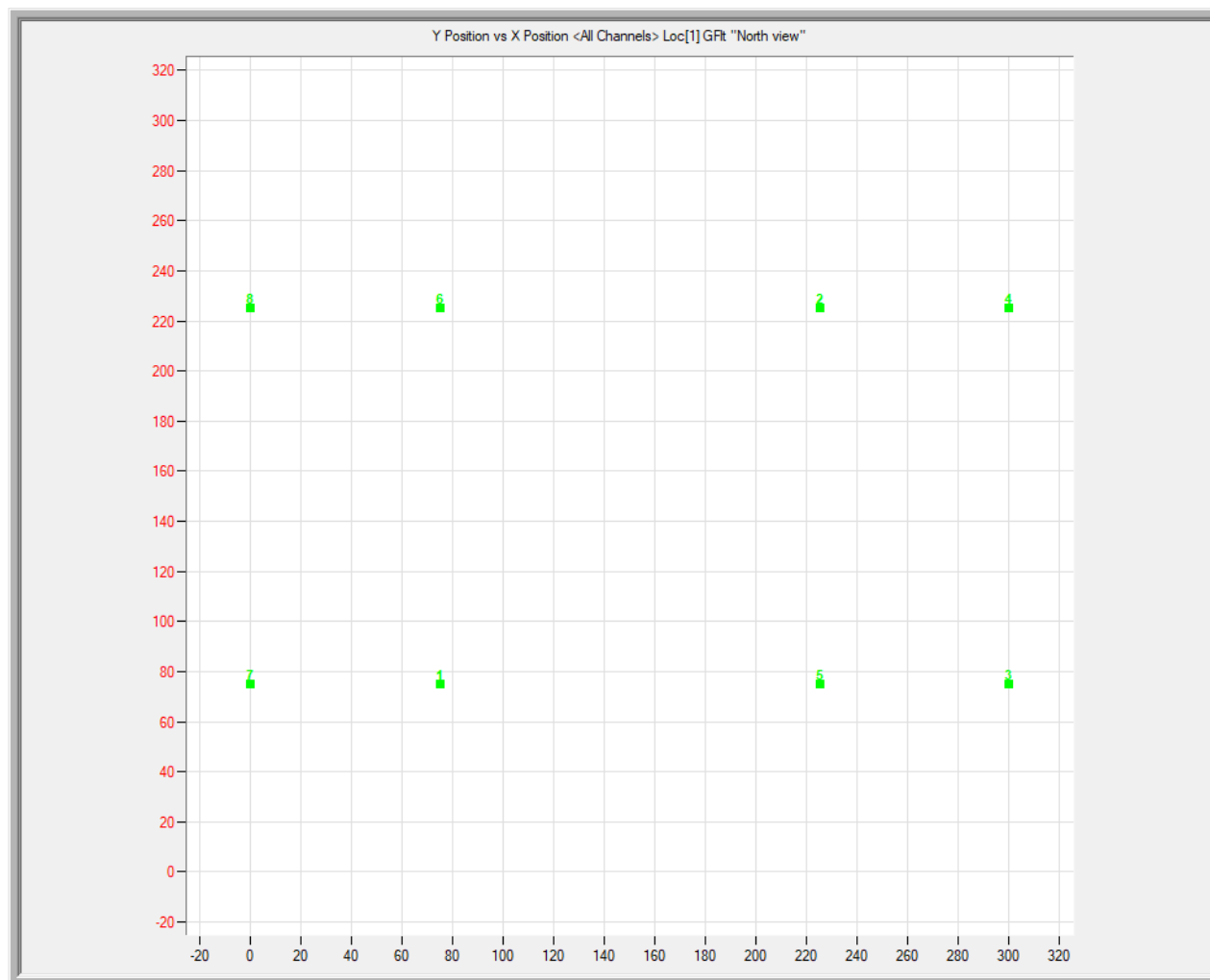
D.1 Utsikt fra vest (looking east)



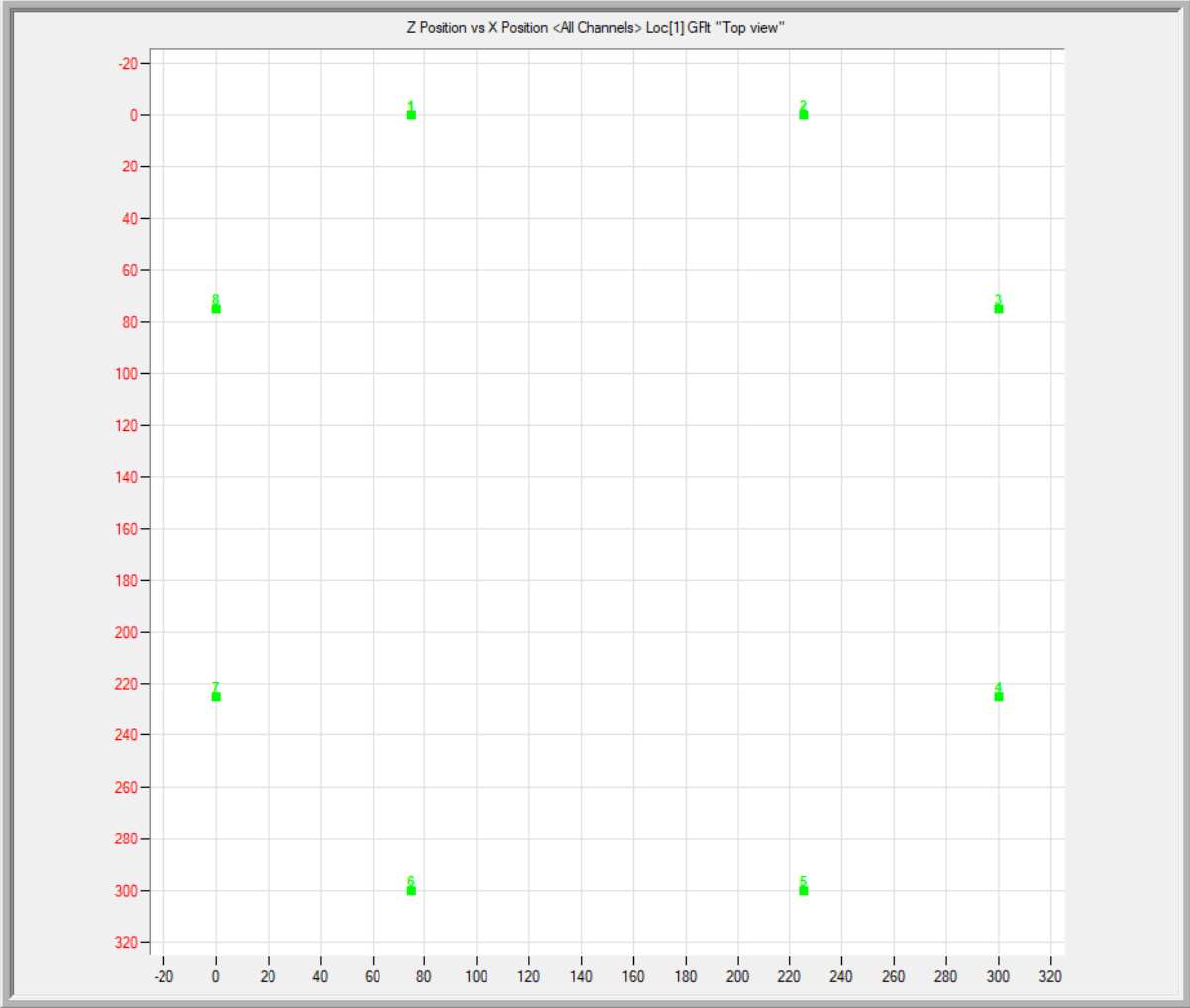
D.2 Utsikt fra øst (looking west)



D.3 Utsikt fra sør (north view)

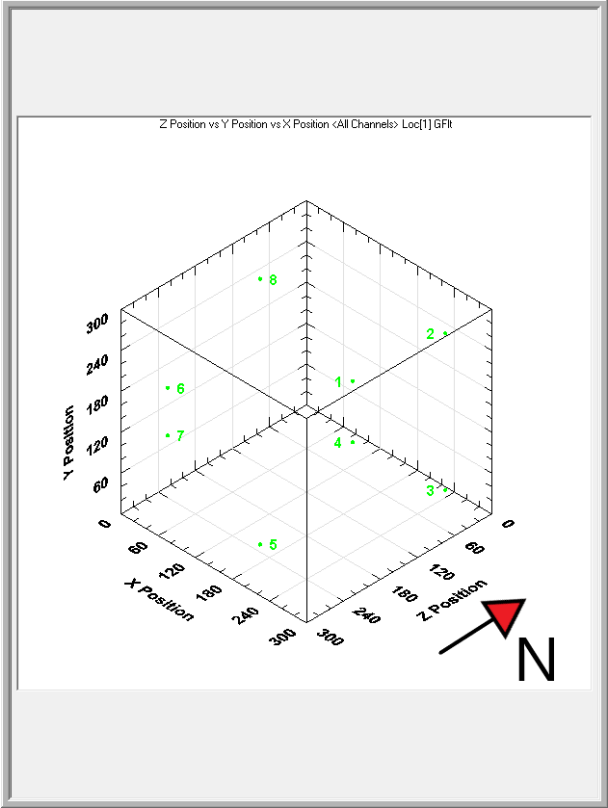


D.4 Fugleperspektiv (top view)



Vedlegg **E**

3D spredningsplott av akustisk emisjon uten data



Vedlegg **F**

Labutstyr

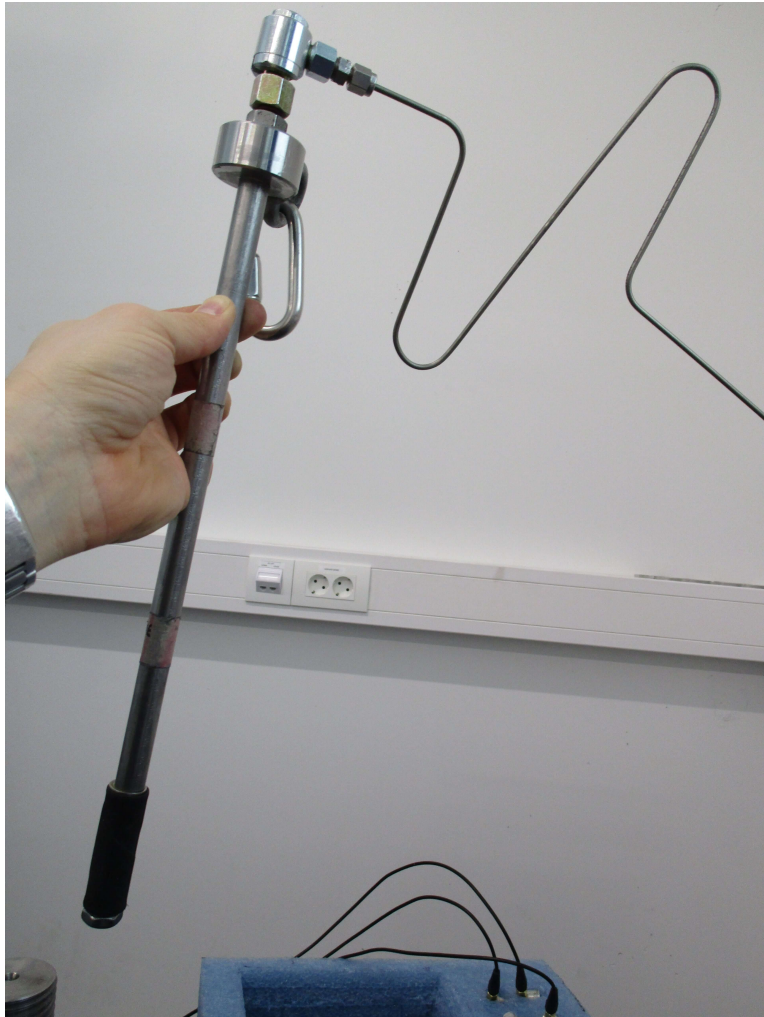
F.1 Håndpumper hovedspenninger (etter Henki Ø)



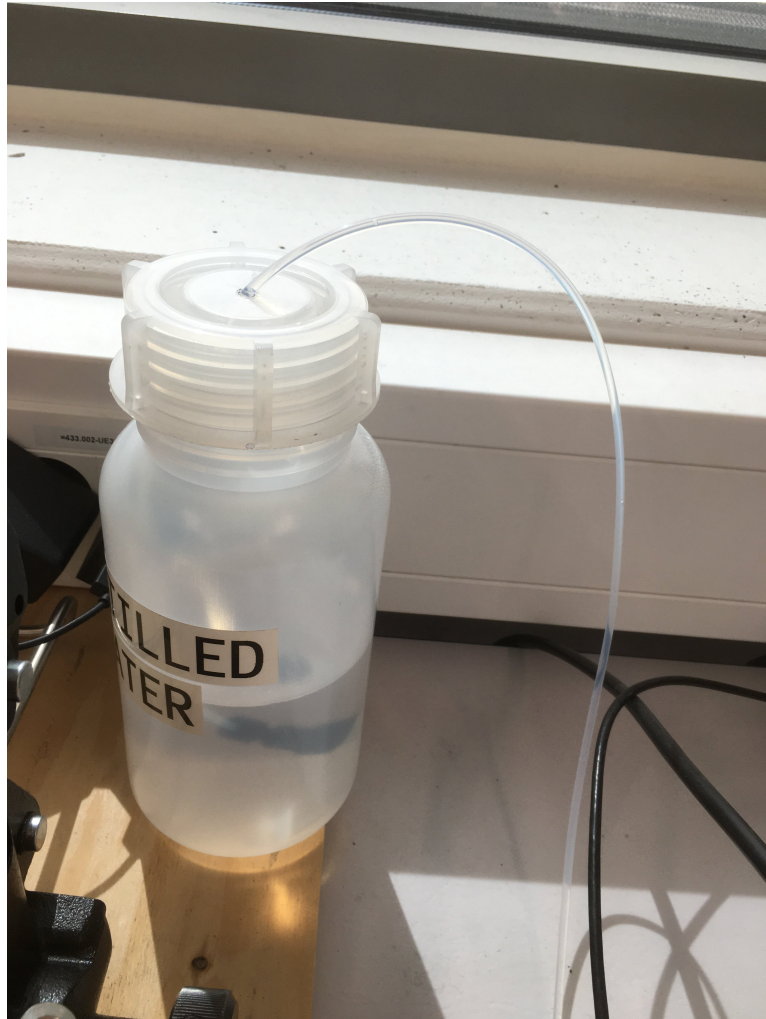
F.2 Pakkerstav (etter Henki Ø)



F.3 Pakkerstav tilkoblet med injeksjonslinje (etter Henki Ø)



F.4 Destillert vann til stempelpumpe (etter Henki Ø)



F.5 Stempelpumpe med ventil og strupning (etter Henki Ø)



F.6 Datamaskin akustisk emisjon (etter Henki Ø)



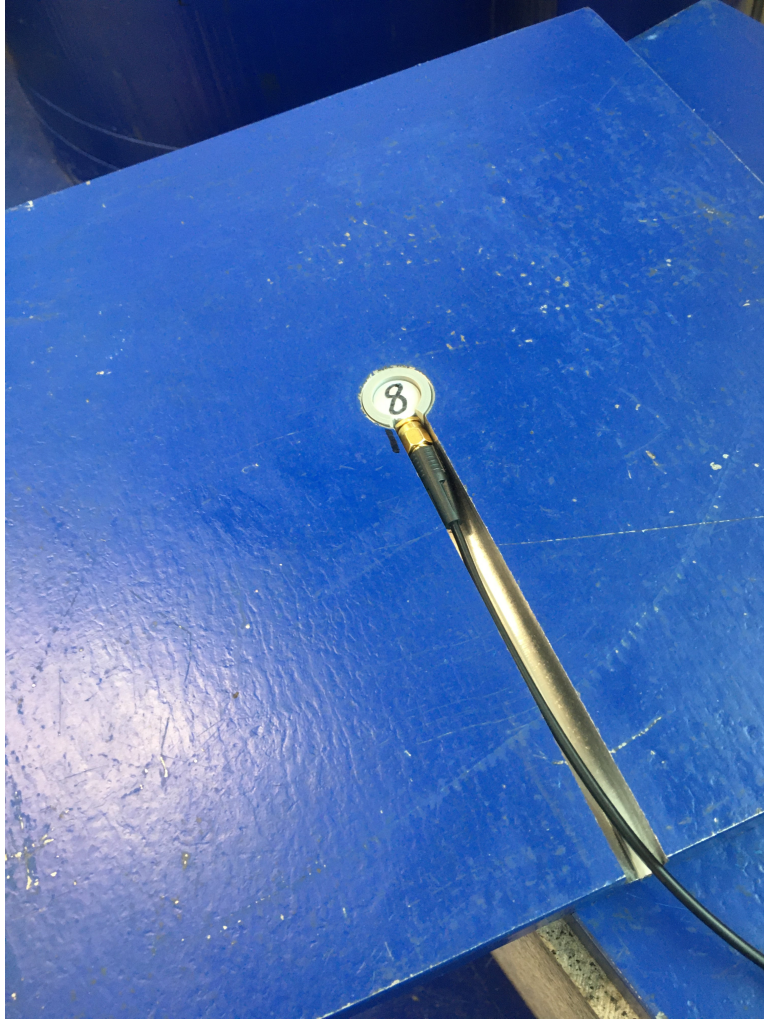
F.7 Blå sensorplate framside (etter Henki Ø)



F.8 Blå sensorplate bakside (etter Henki Ø)

F.9 Akustisk emisjonsensor med gummikledning (etter Henki Ø)



F.10 Sensorplate med plassert AE sensor (etter Henki Ø)

F.11 Forforsterkere (etter Henki Ø)



Labresultat sprekkegeometri

Dette kapitlet viser resultater fra laboratoriearbeidet som ikke er presentert direkte i teksten.

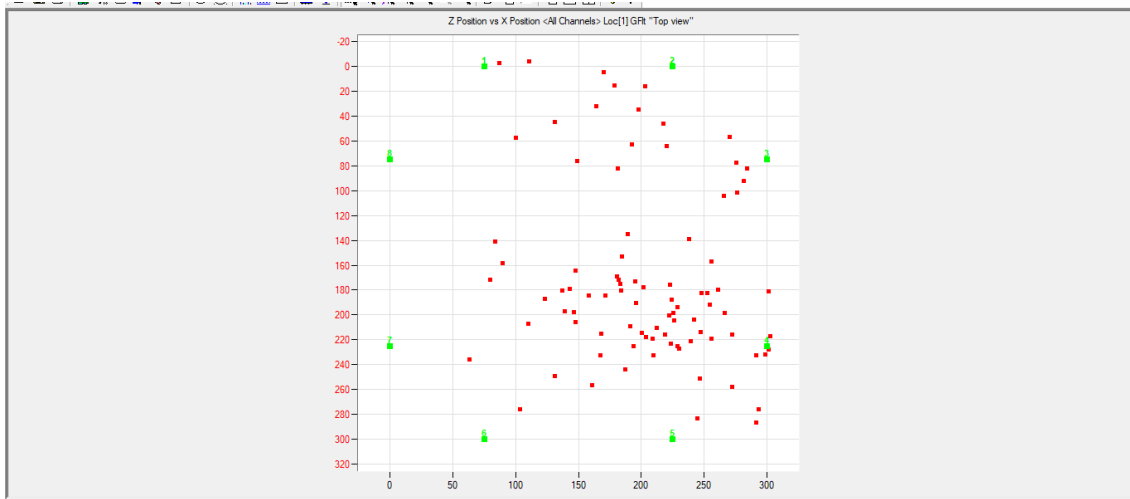
G.1 Oversikt over presenterte testforsøk

Date	σ_H	Direction	σ_h	Direction2	σ_v	Direction3	Tangential stress min (MPa)	Tangential stress max (MPa)	File ID	Comment
04.12.2019	6	E-W (Line 1)	2	N-S (Line 2)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20191204114206	Splitting av sprekk 101 i ID.001. Ingen målt AE.
21.02.2020	6	E-W (Line 1)	3	N-S (Line 2)	4	Vertical (Line 3)	3	15	20200221133901	Jekking av 101 i ID.001. Brukt i sprekketolkning og trykkanalyse av flowback. Kalibrert strupning på 0,6 Mpa ved 30mL/min
03.02.2020	6	E-W (Line 1)	2	N-S (Line 2)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20200203115542	Splitting av sprekk 201 på ID.002
11.02.2020	6	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 1)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20200211122403	Splitting av sprekk 301 på ID.003
11.02.2020	6	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 1)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20200211135153	Jekketest, flowback med kalibrert choke (0,4 MPa ved 50 ml/min). Brukt til å kartlegge AE mot sprekk 301 på ID.003
09.03.2020	10	E-W (Line 1)	2	N-S (Line 2)	3	Vertical (Line 3)	-4	28	20200309124658	Splitting av sprekk 302 på ID.003. Brukt til å kartlegge AE mot sprekk 302 på ID.003
09.03.2020	10	E-W (Line 1)	10	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 2)	20	20	20200309134652	Splitting av sprekk 303 på ID.003

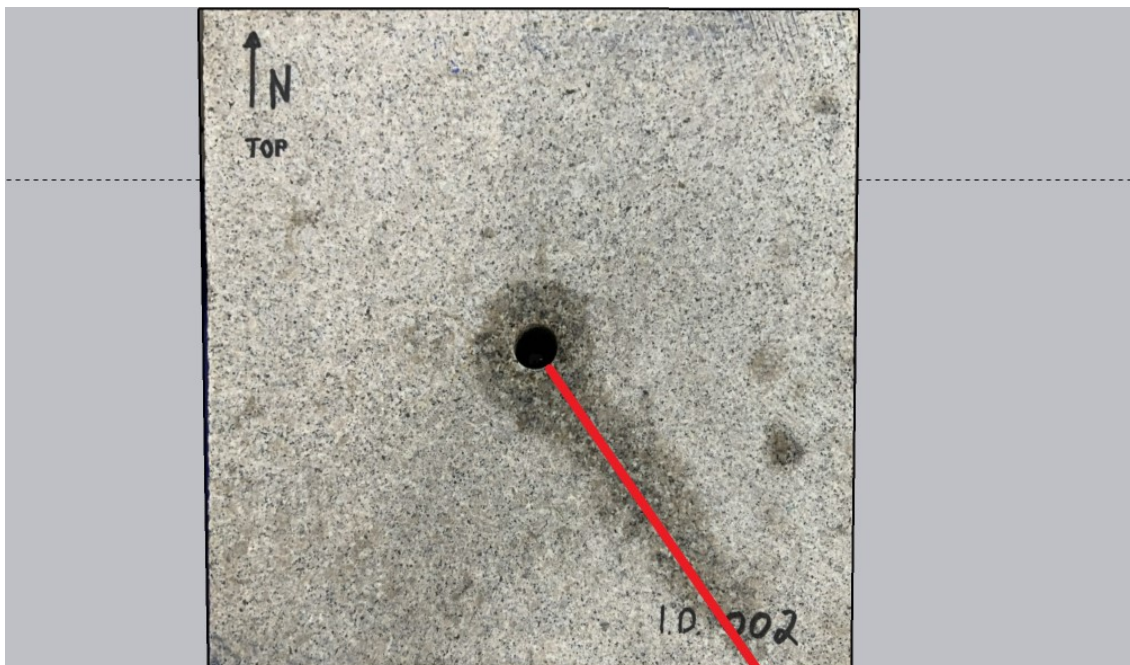
09.03.2020	10	E-W (Line 1)	10	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 2)	20	20	20200309140146	Jekketest, flowback med kontrollert choke; 0,6 MPa på 75 ml/min. Brukt til å kartlegge AE mot sprekk 303 og i analyse av trykkdata.
28.04.2020	6	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 1)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20200428141728	Splitting av sprekk 401 på ID.004, lukking med shut-in. Brukt til å kartlegge AE mot sprekk 401 og i analyse av trykkdata
11.02.2020	6	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 1)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20200211130903	Jekketest, shut-in prosedyre av sprekk 301. Brukt til trykkanalyse
29.04.2020	6	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 1)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20200429123555	Stegvis jekkeforsøk, 0,5 MPa stigning/synkning. Sprekk 401 på ID.004
29.04.2020	6	N-S (Line 2)	2	E-W (Line 1)	3	Vertical (Line 3)	0	16	20200429131909	Stegvis jekkeforsøk, 0,25 MPa stigning/synkning. Sprekk 401 på ID.004

G.2 2D figurer sprekkenummer 201

G.2.1 Fugleperspektiv

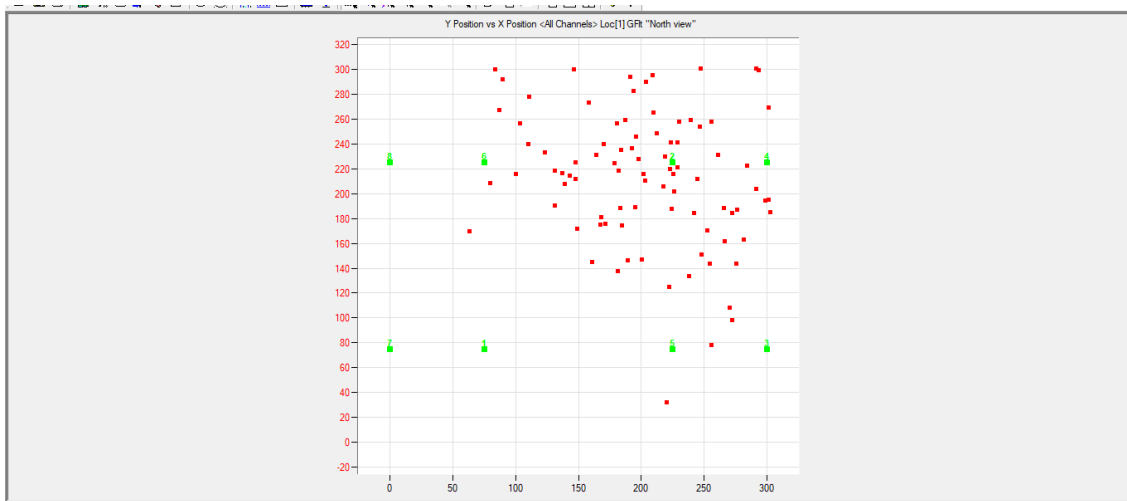


Figur G.1: 2D-plott av AE events i prøve ID.002 under testforsøk 20200203115542 sett ovenfra.

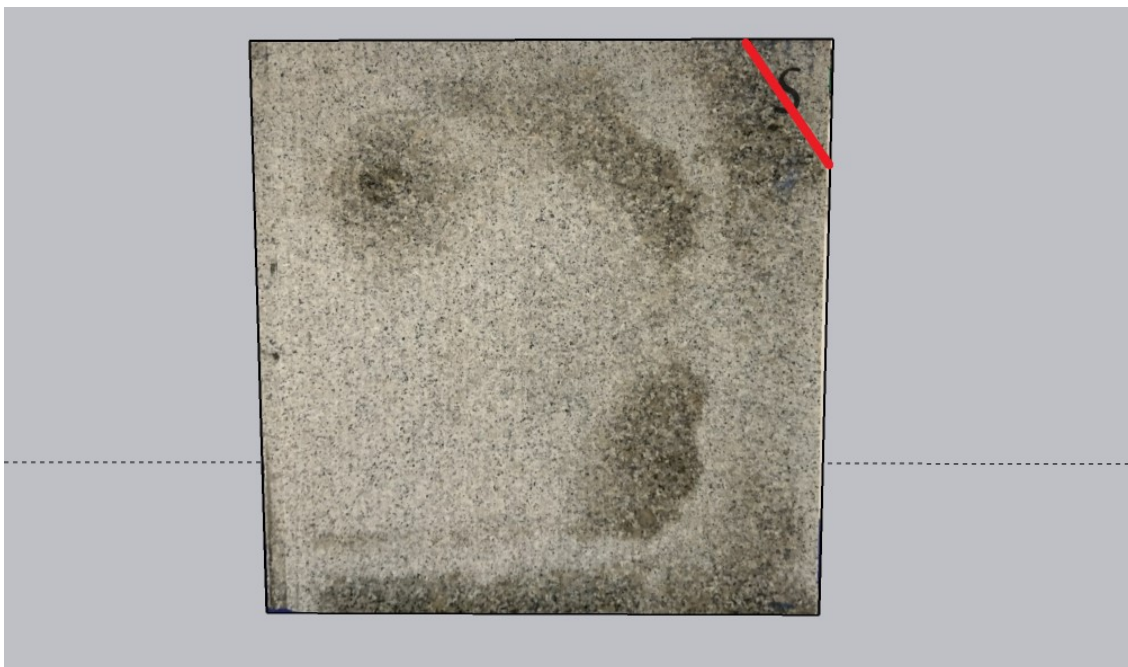


Figur G.2: Prøve ID.002 sett ovenfra. Tolket sprekke er markert i svart linje. Bilde er tatt 02.03.2020 og er redigert i SketchUp pro.

G.2.2 Utsikt fra sør

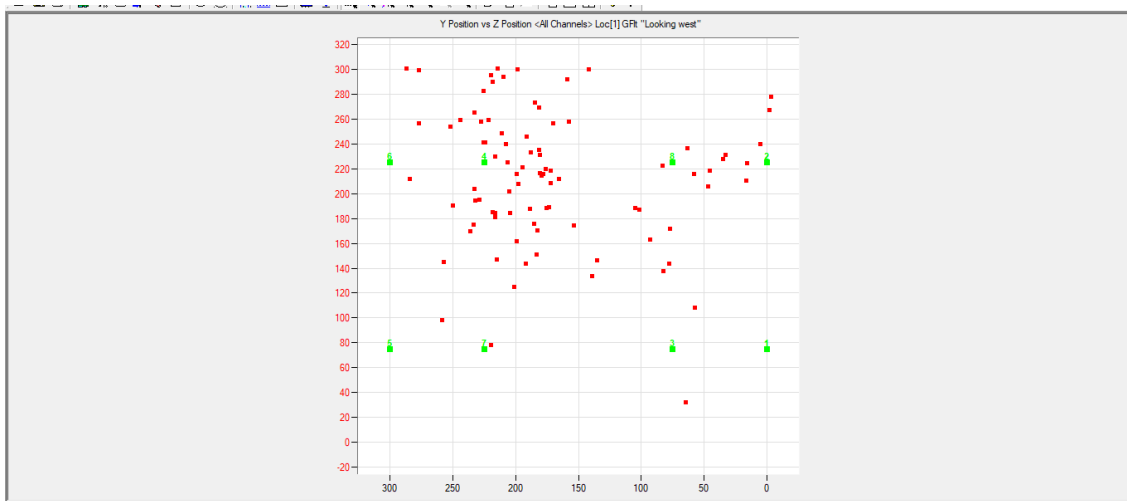


Figur G.3: 2D-plott av AE events i prøve ID.002 under testforsøk 20200203115542. Rettet mot nord.

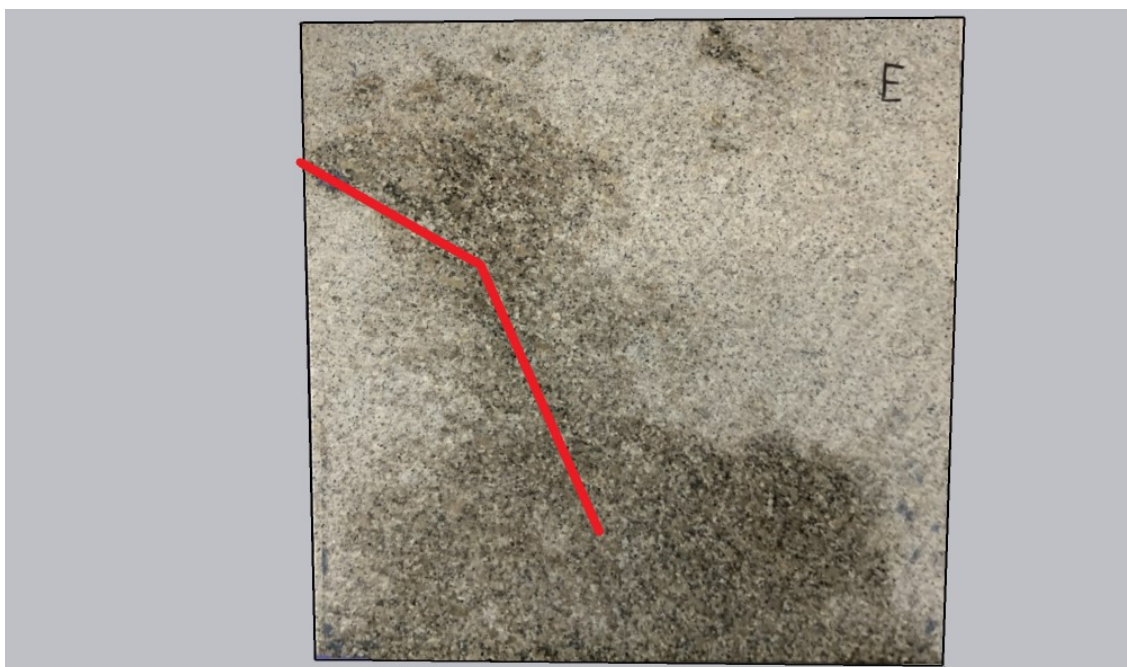


Figur G.4: Sørlig overflate av prøve ID.002. Tolket sprekk er markert i svart linje (øvre hjørne til høyre). Bilde er tatt 02.03.2020 og redigert i SketchUp pro.

G.2.3 Utsikt fra øst



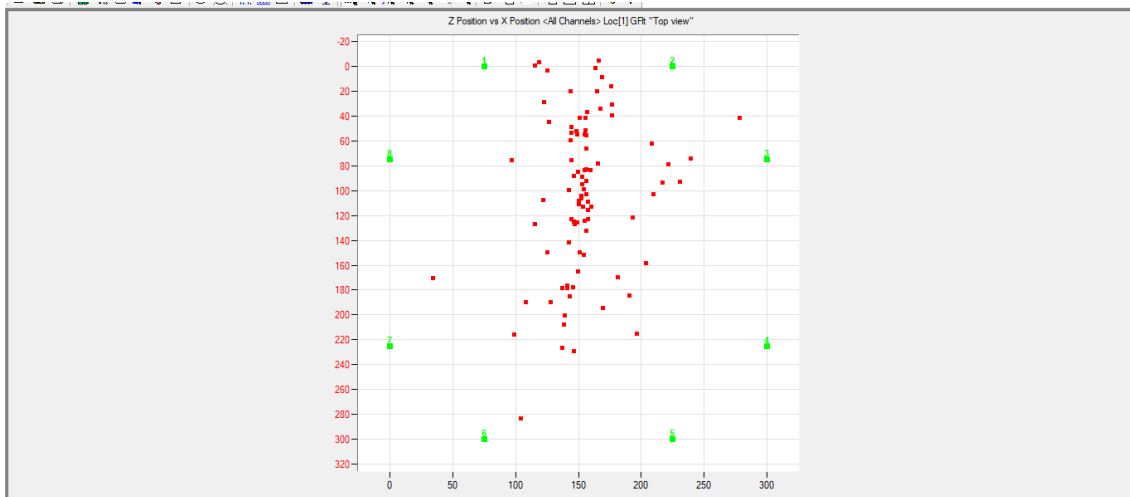
Figur G.5: 2D-plott av AE events i prøve ID.002 under testforsøk 20200203115542. Rettet mot vest.



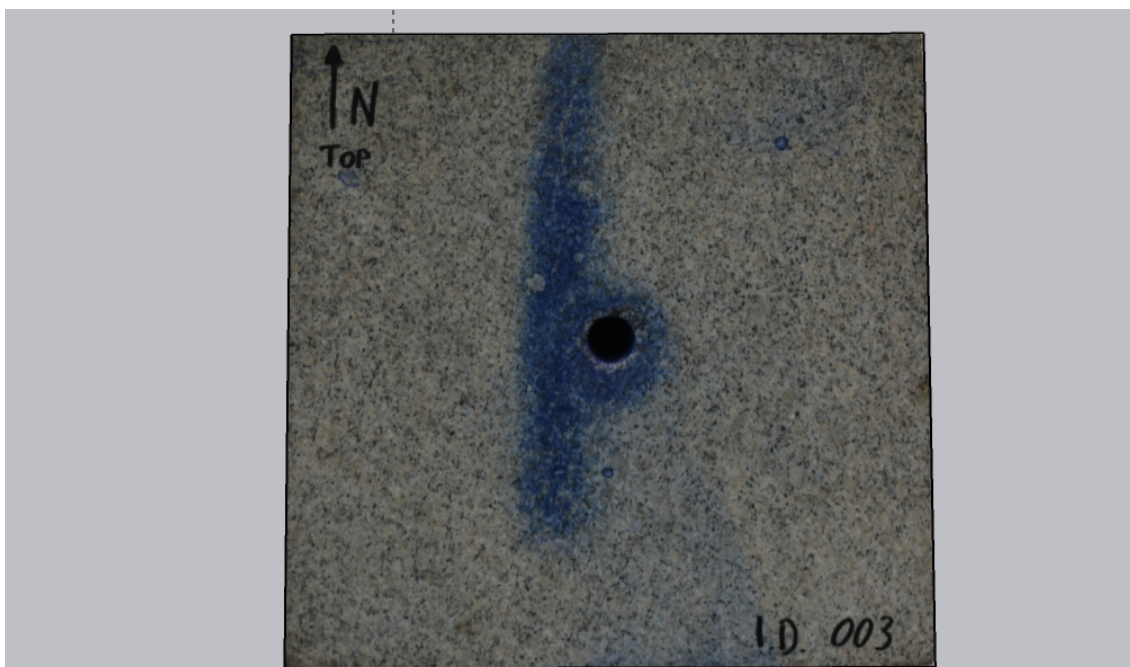
Figur G.6: Østlig overflate av prøve ID.002. Tolket sprekk er markert i svart linje. Bilde er tatt 02.03.2020 og redigert i SketchUp pro.

G.3 2D figurer sprekkenummer 301

G.3.1 Fugleperspektiv

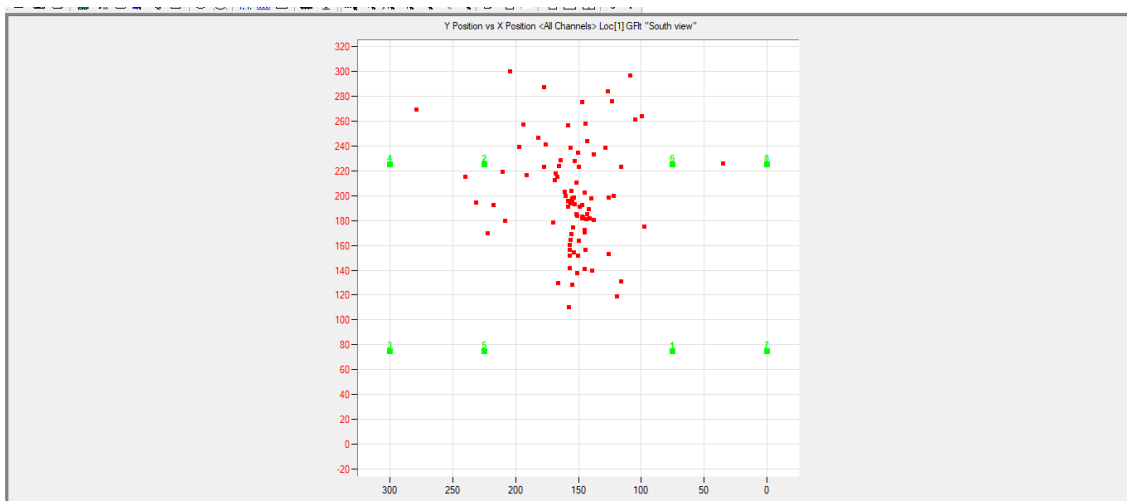


Figur G.7: 2D-plott av AE events i prøve ID.003 under testforsøk 20200211135153 sett ovenfra.

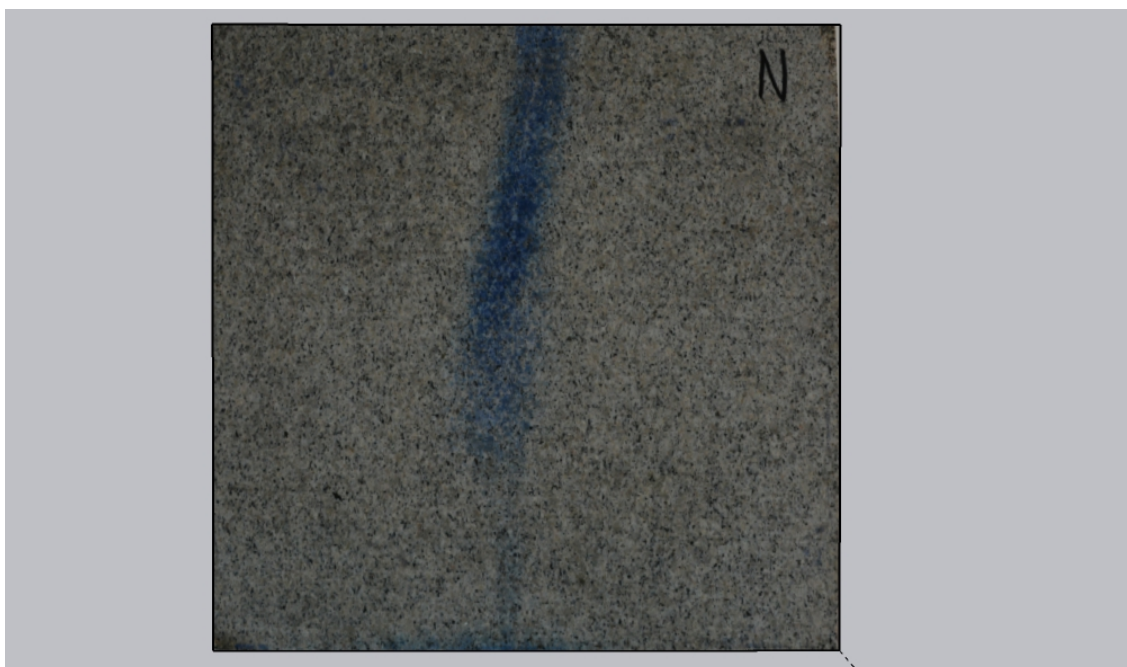


Figur G.8: Prøve ID.003 sett ovenfra med sprekke 301 markert i metylblått. Bildet er tatt av 11.02.2020 av Henki Ødegaard og er redigert i SketchUp pro.

G.3.2 Utsikt fra nord



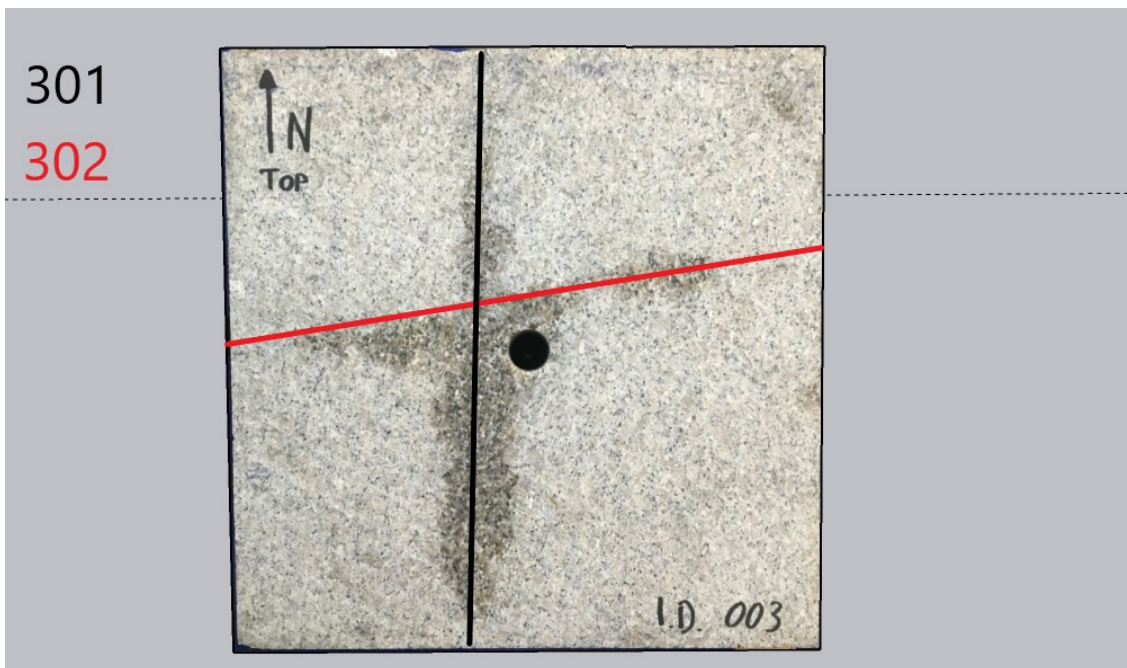
Figur G.9: 2D-plott av AE events i prøve ID.003 under testforsøk 20200203115542. Rettet mot sør.



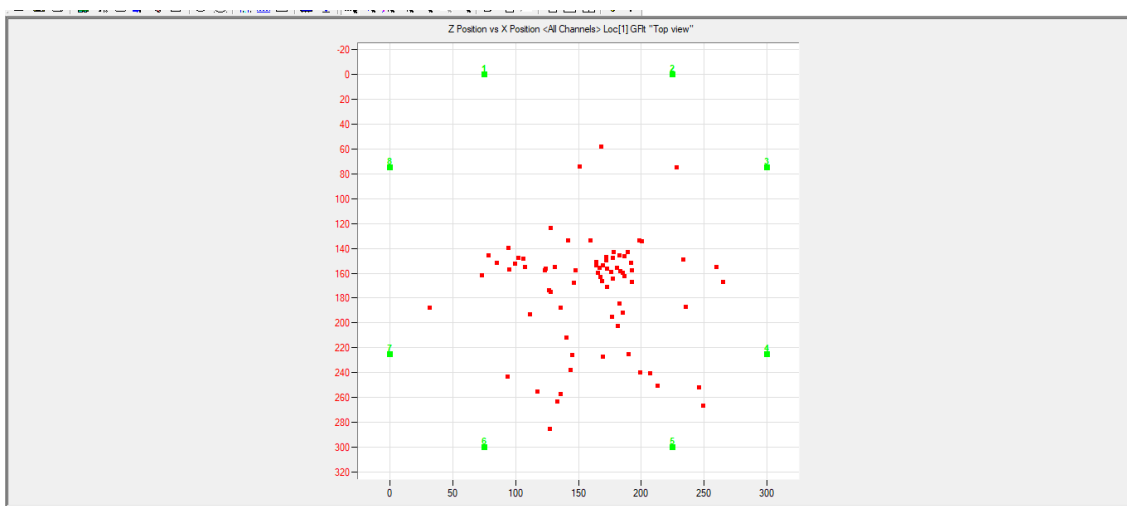
Figur G.10: Nordlig overflate av prøve ID.002. Tolket sprekk er markert i methyblått. Bilde er tatt 11.02.2020 av Henki Ødegaard og redigert i SketchUp pro.

G.4 2D figurer Sprekkenummer 302 og 303

G.4.1 Fugleperspektiv

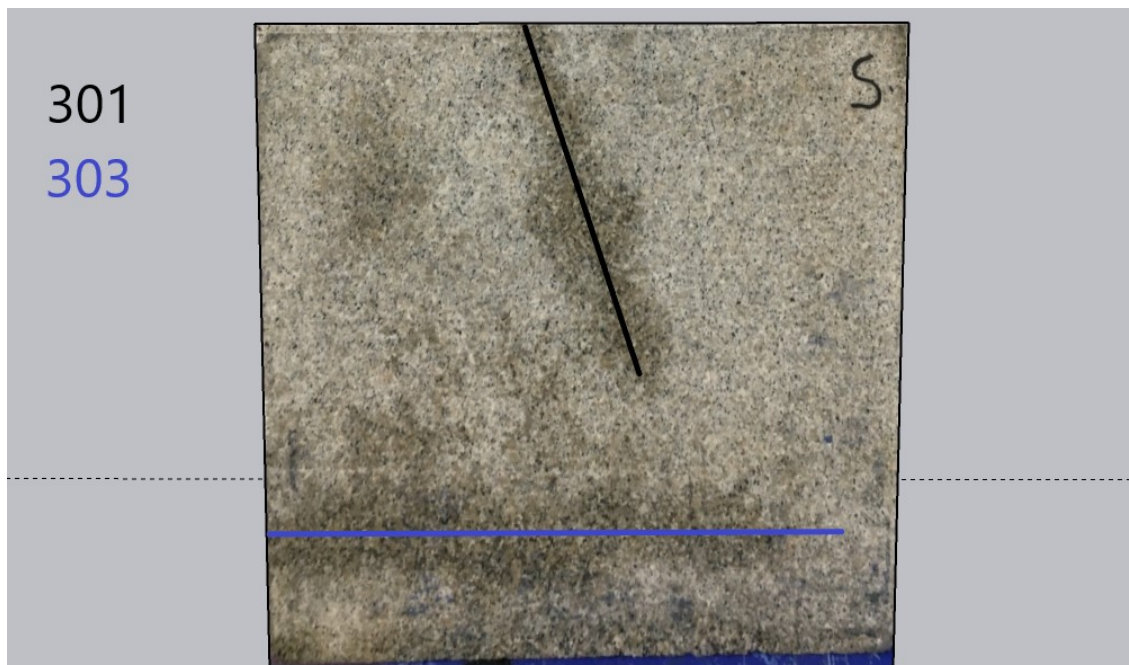


Figur G.11: Bergartsprøve 003 sett ovenfra etter splitting av alle sprekker. Tolkning av sprekk 301 og 302 er markert. Bilde er tatt 09.03.2020 av Henki Ødegaard og redigert i SketchUp pro.

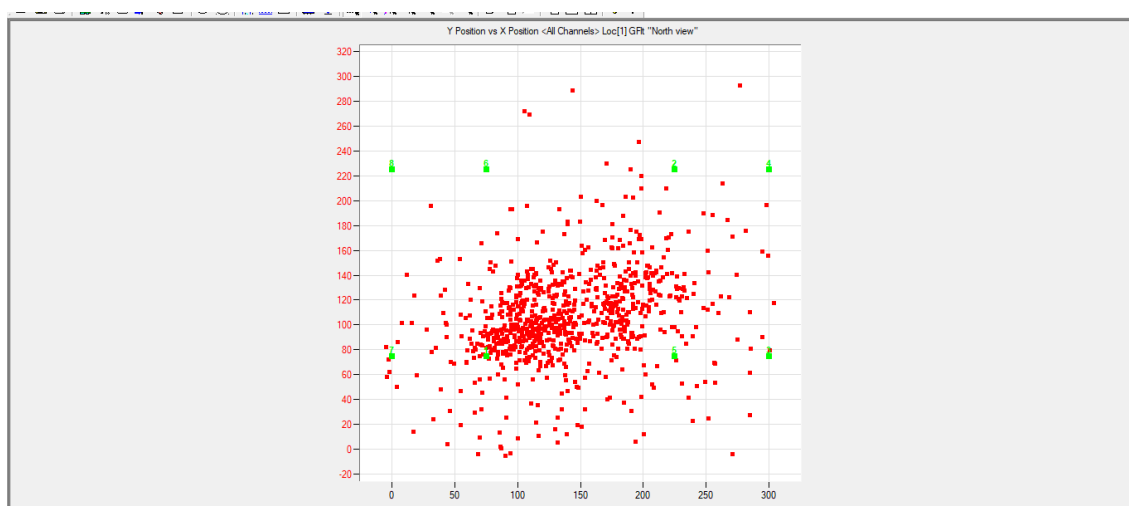


Figur G.12: 2D plott av Ae events i prøve ID.003 under testforsøk 20200309124658. Plottet er sett ovenfra under splitting av sprekk 302.

G.4.2 Utsikt fra sør

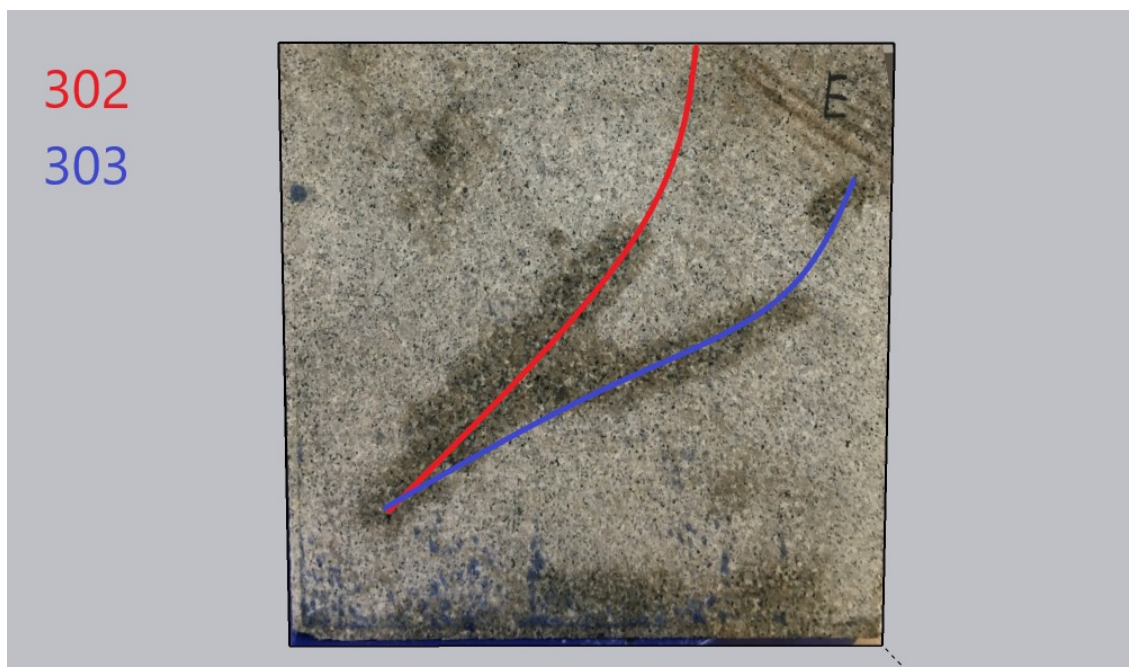


Figur G.13: Bergartsprøve 003 sett fra sør etter splitting av alle sprekker. Tolkning av sprekke 301 og 303 er markert. Bilde er tatt 09.03.2020 av Henki Ødegaard og redigert i SketchUp pro.

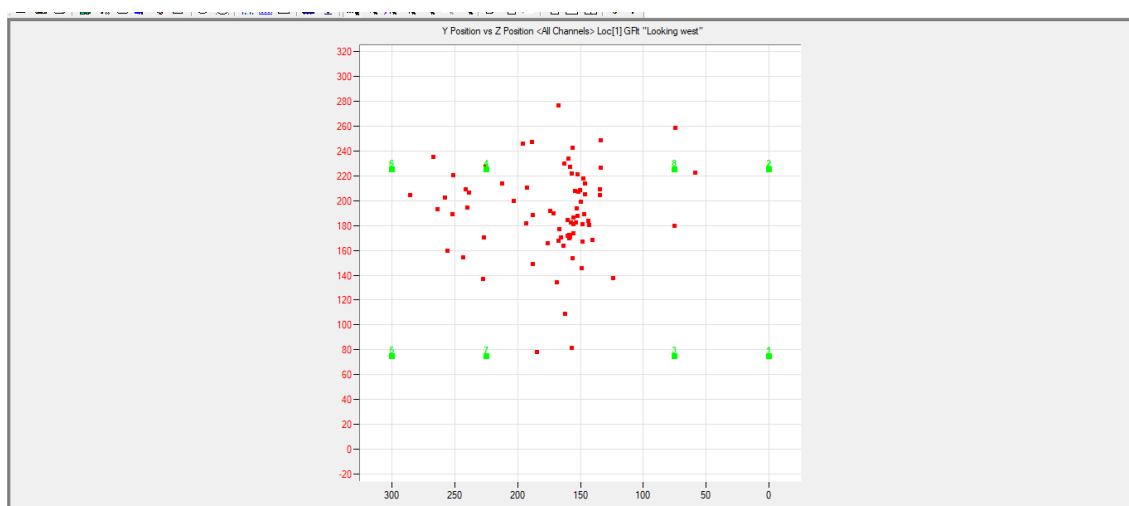


Figur G.14: 2D plott av Ae events i prøve ID.003 under testforsøk 20200309140146. Plottet er sett sørfra under jekking av sprekke 303.

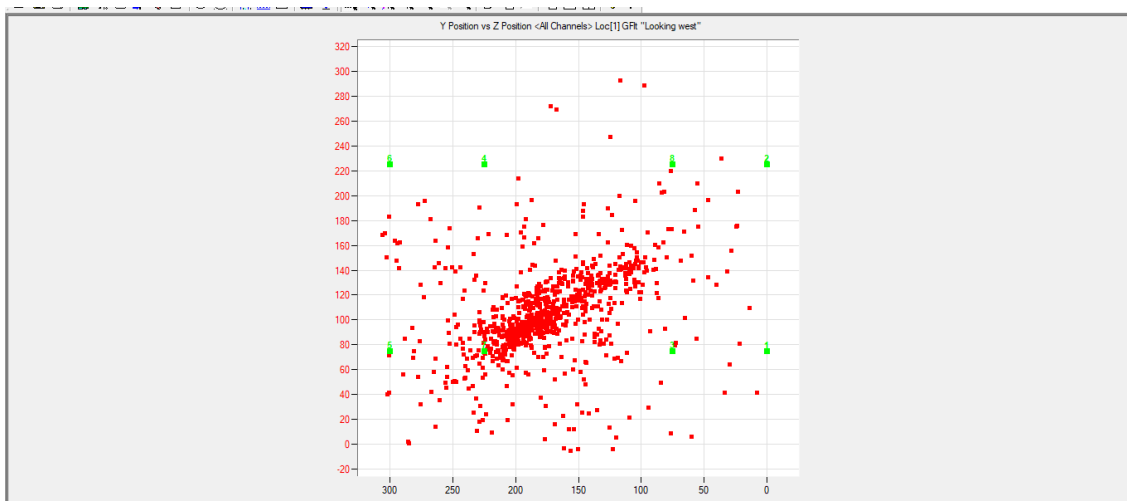
G.4.3 Utsikt fra øst



Figur G.15: Bergartsprøve 003 sett fra øst etter splitting av alle sprekker. Tolkning av sprekke 302 og 303 er markert. Bilde er tatt 09.03.2020 av Henki Ødegaard og redigert i SketchUp pro.



Figur G.16: 2D plott av Ae events i prøve ID.003 under testforsøk 20200309124658. Plottet er sett østfra under splitting av sprekke 302.

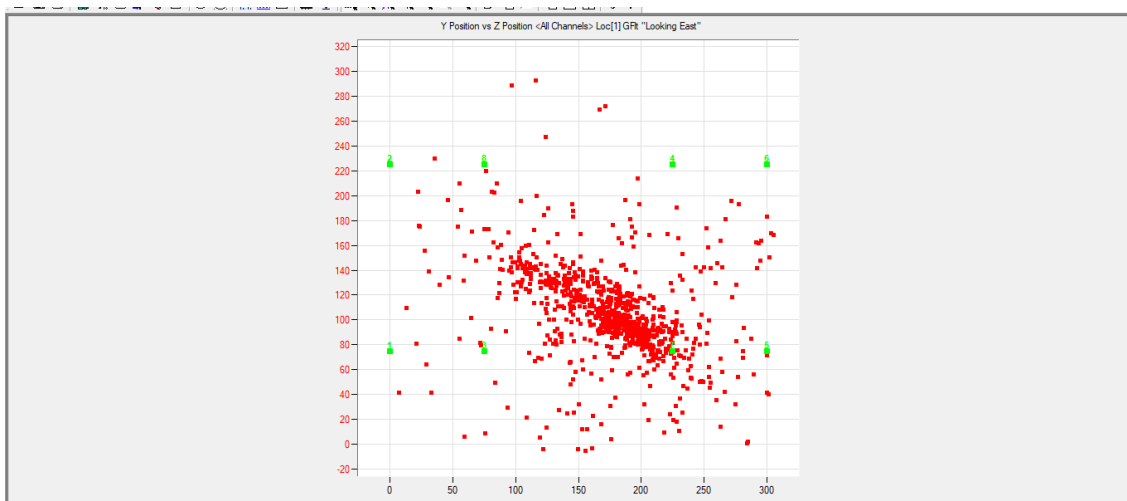


Figur G.17: 2D plott av Ae events i prøve ID.003 under testforsøk 20200309140146. Plottet er sett østfra under jekking av sprekk 303.

G.4.4 Utsikt fra vest



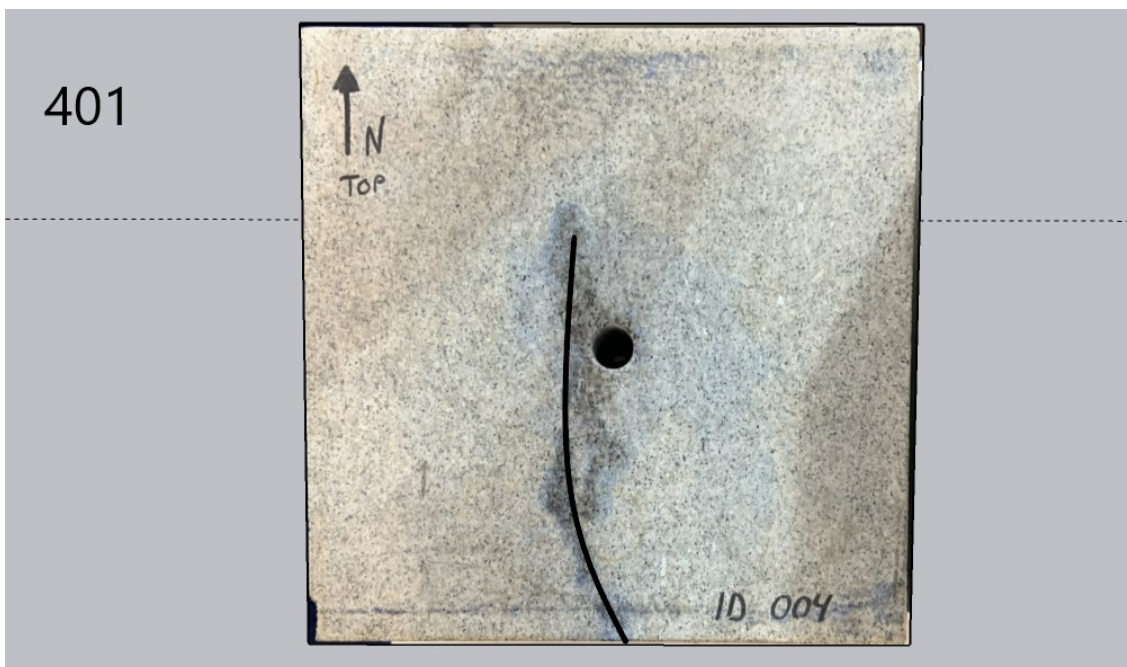
Figur G.18: Bergartsprøve 003 sett fra vest etter splitting av alle sprekker. Tolkning av sprekk 303 er markert. Bilde er tatt 09.03.2020 av Henki Ødegaard og redigert i SketchUp pro.



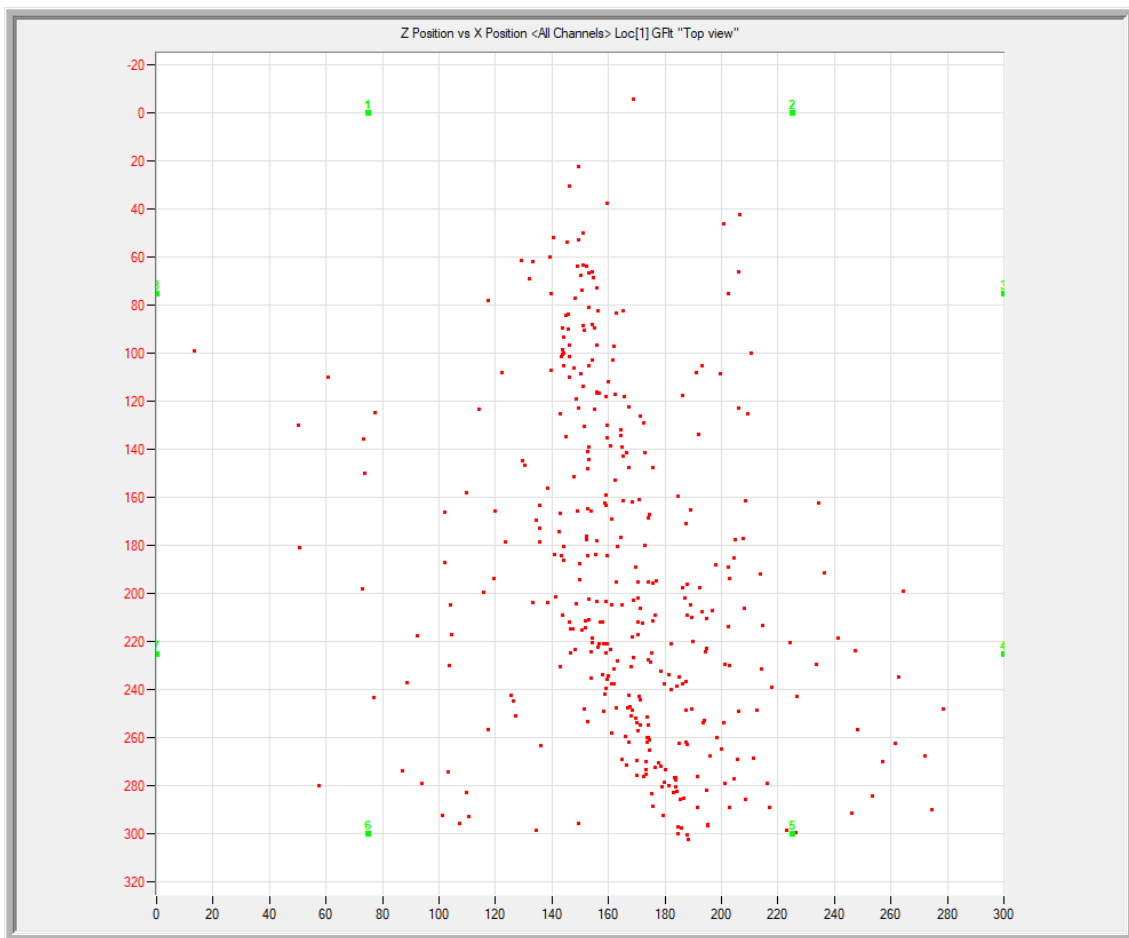
Figur G.19: 2D plott av Ae events i prøve ID.003 under testforsøk 20200309140146. Plottet er sett vestfra under jekking av sprekk 303.

G.5 2D figurer Sprekkenummer 401

G.5.1 Fugleperspektiv



Figur G.20: Bergartsprøve 004 sett ovenfra etter splitting av sprekk 401. Sprekk er markert i svart. Bilde er tatt 28.04.2020 og redigert i SketchUp pro.

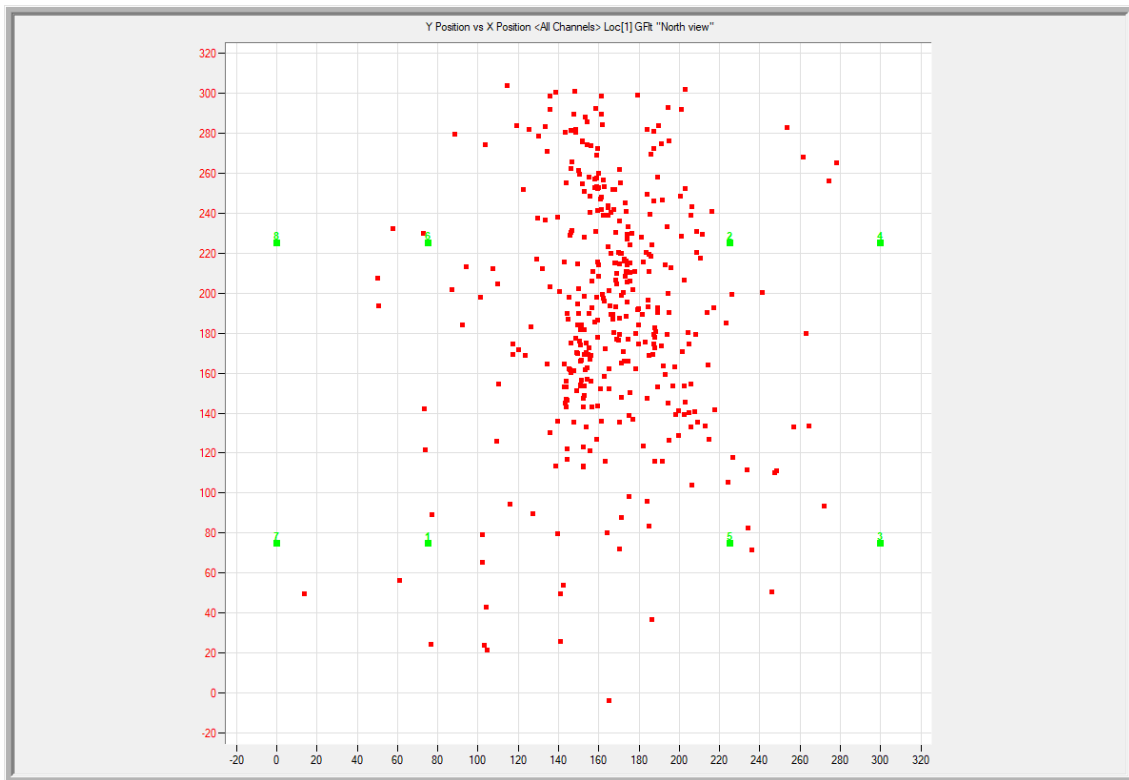


Figur G.21: 2D plott av AE events i prøve ID.004 under testforsøk 20200428141728. Plottet er sett ovenfra under splitting av sprekk 401.

G.5.2 Sett fra sør



Figur G.22: Bergartsprøve 004 sett sørfra etter splitting av sprekk 401. Sprekk er markert i svart. Bilde er tatt 29.04.2020 og redigert i SketchUp pro.



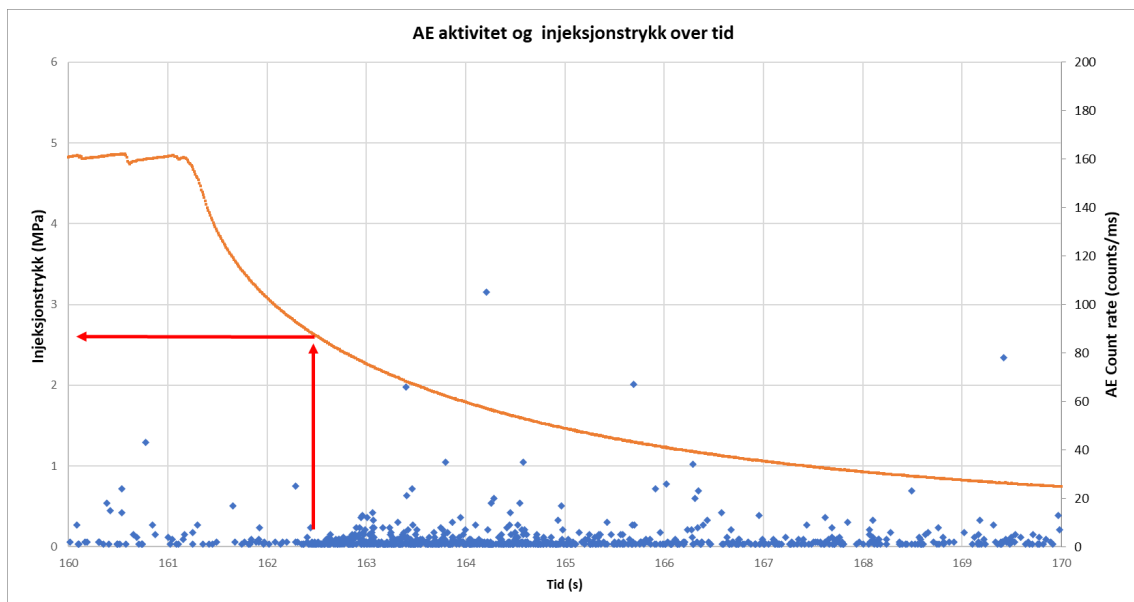
Figur G.23: 2D plott av AE events i prøve ID.004 under testforsøk 20200428141728. Plottet er sett sørfra under splitting av sprekk 401.

Resultater shut-in tester

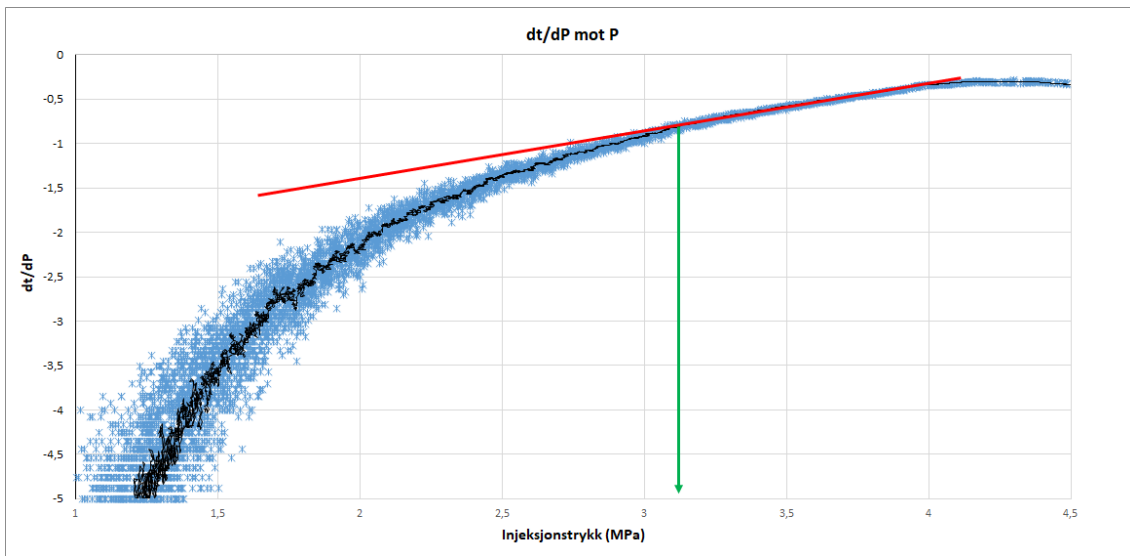
H.1 Shut-in test 1

Resultater fra resterende jekkerunder i testnummer 20200211130903.

H.1.1 Andre jekking

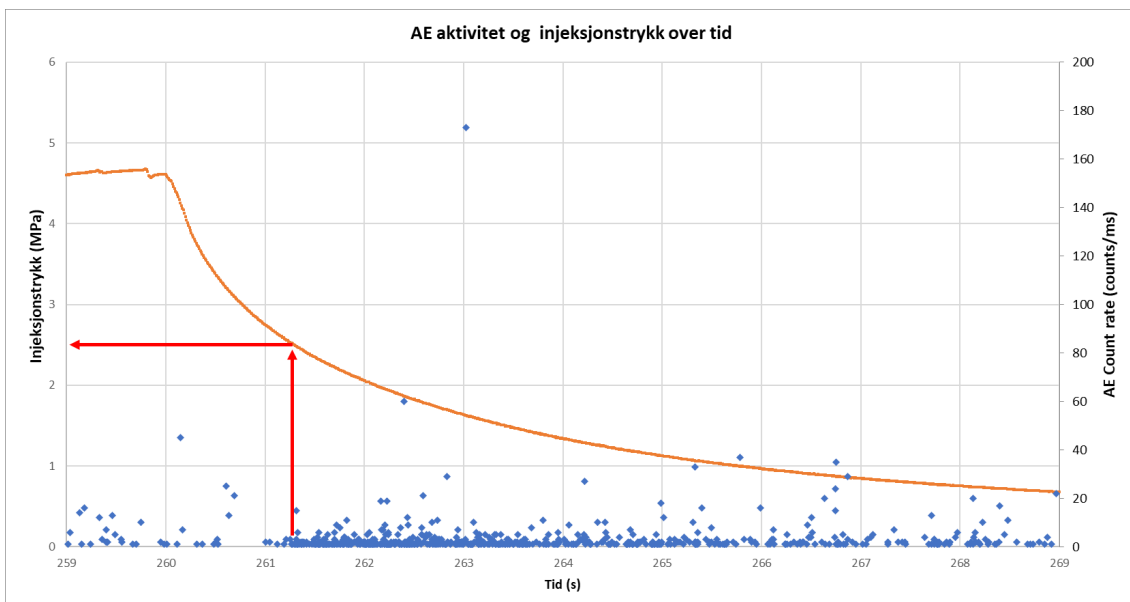


Figur H.1: Trykk og AE aktivitet under shut-in fasen for andre jekking under test 20200211130903. Tolket lukking fra AE aktivitet er vist med røde linjer.

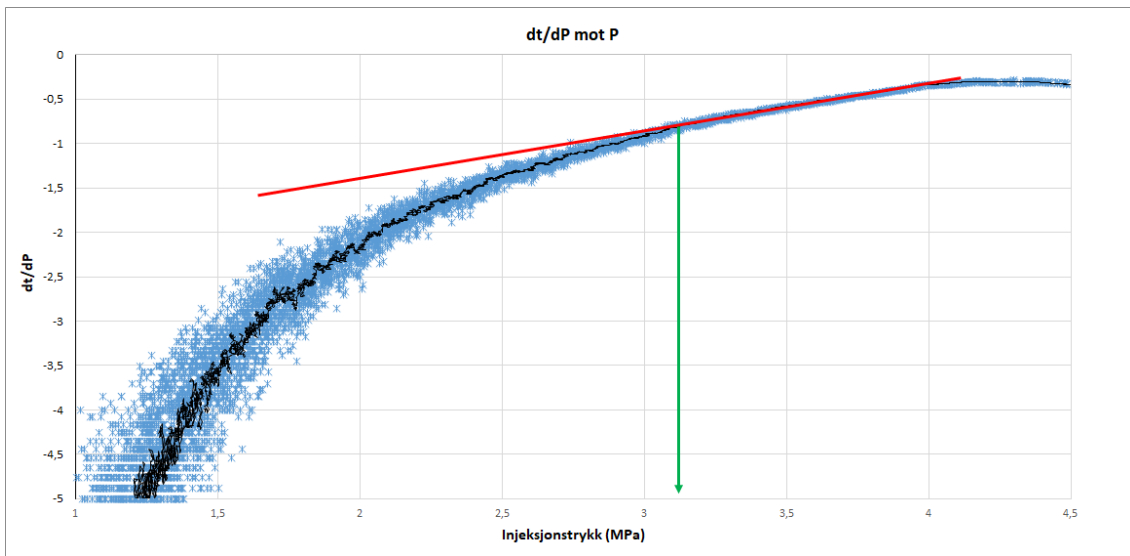


Figur H.2: $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P i shut-in fasen for andre jekking under test 20200211130903. Tolket trykk ved lukking av sprekk er vist med grønn linje, mens lineær startfase er vist med rød linje.

H.1.2 Tredje jekking



Figur H.3: Trykk og AE aktivitet under shut-in fasen for tredje jekking under test 20200211130903. Tolket lukking fra AE aktivitet er vist med røde linjer.

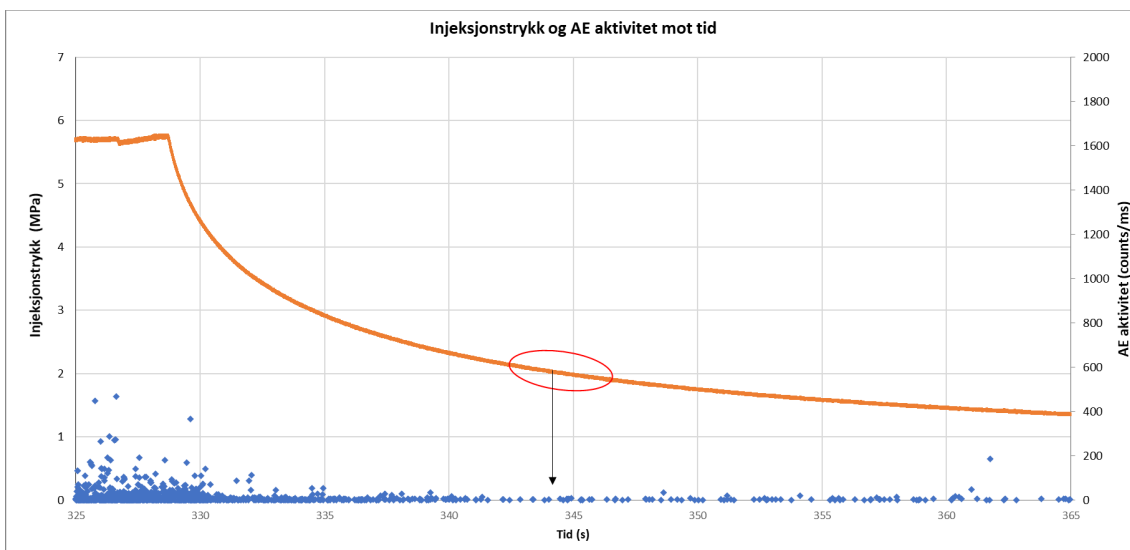


Figur H.4: $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P i shut-in fasen for tredje jekking under test 20200211130903. Tolket trykk ved lukking av sprekk er vist med grønn linje, mens lineær startfase er vist med rød linje.

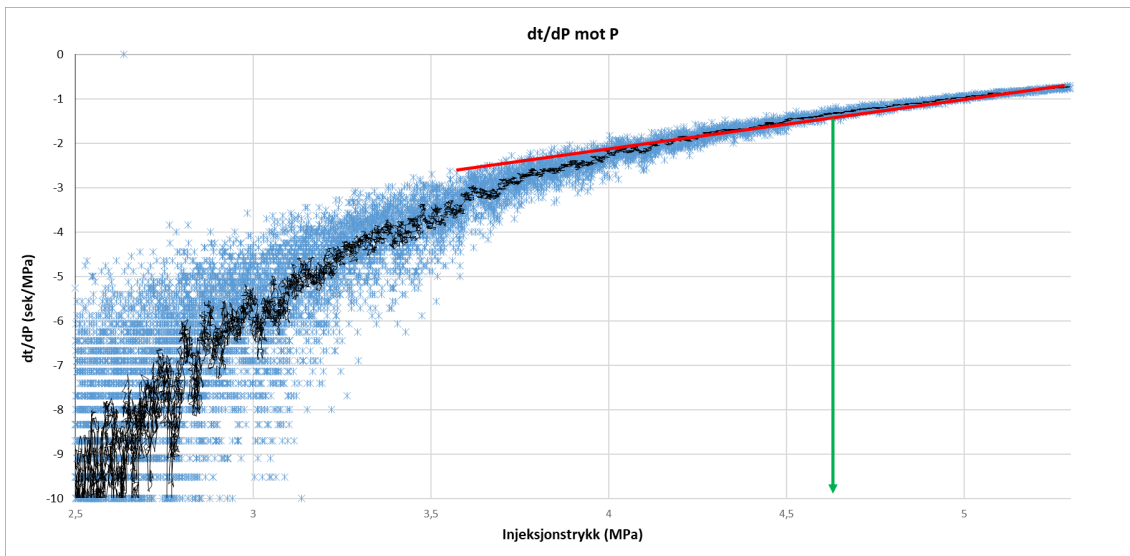
H.2 Shut-in test 2

Resultater fra resterende jekkerunder i testnummer 20200428141728 etter første splitte-
runde.

H.2.1 Første jekking

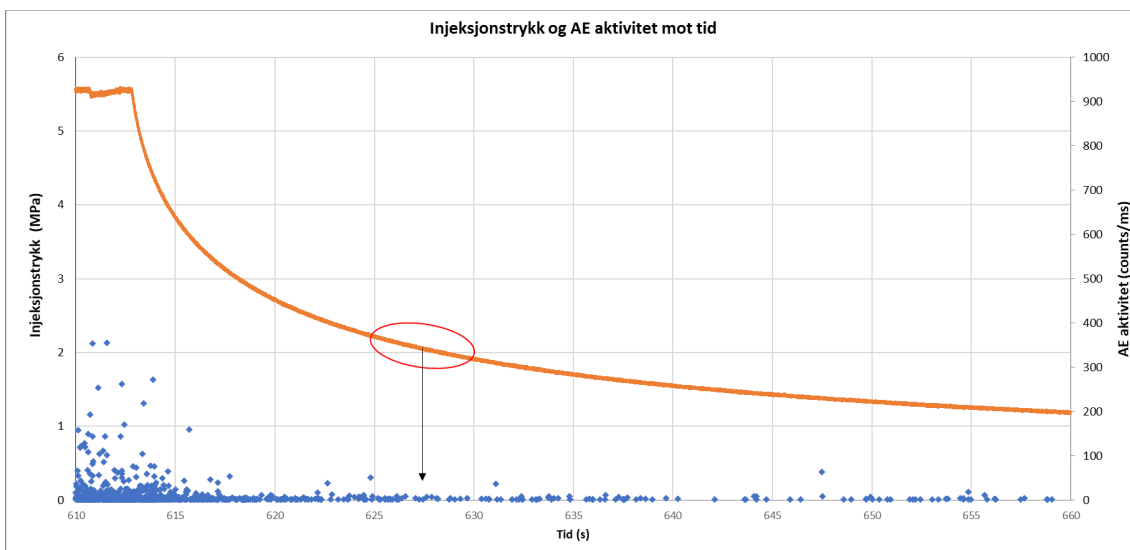


Figur H.5: Trykk og AE aktivitet under shut-in fasen for første jekking under test 20200428141728. Rød ring med blå pil viser hvor lukking av sprekk er forventet å inntreffe ut ifra beregnet normal-
spenning. Ingen klar AE aktivitet for sprekkelukking.

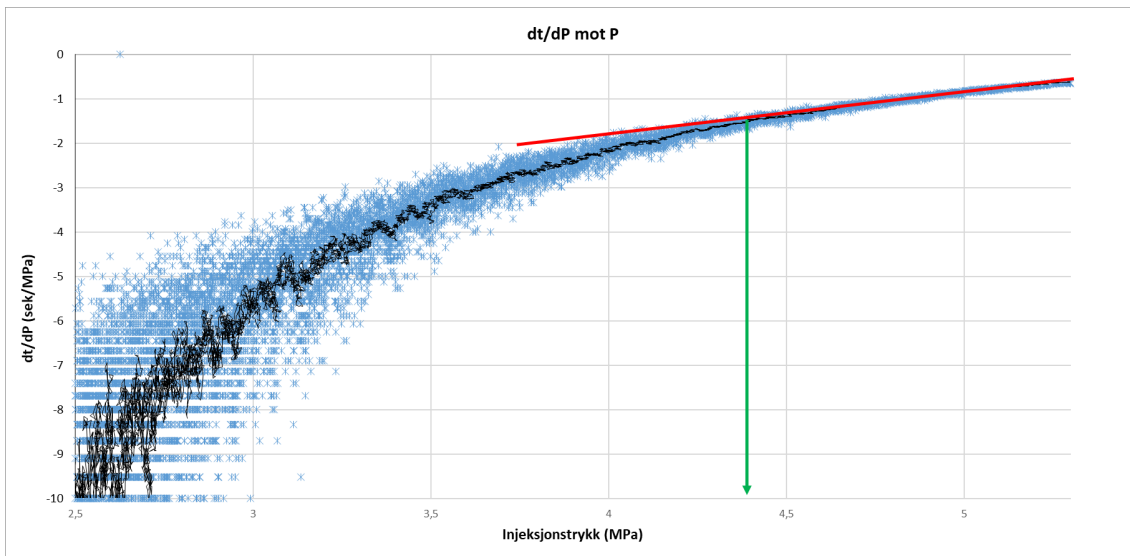


Figur H.6: $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P i shut-in fasen for første jekking under test 20200428141728. Tolket trykk ved lukking av sprekk er vist med grønn linje, mens lineær startfase er vist med rød linje.

H.2.2 Andre jekking



Figur H.7: Trykk og AE aktivitet under shut-in fasen for andre jekking under test 20200428141728. Rød ring med blå pil viser hvor lukking av sprekk er forventet å inntreffe ut ifra beregnet normal-spending. Ingen klar AE aktivitet for sprekkelukking.



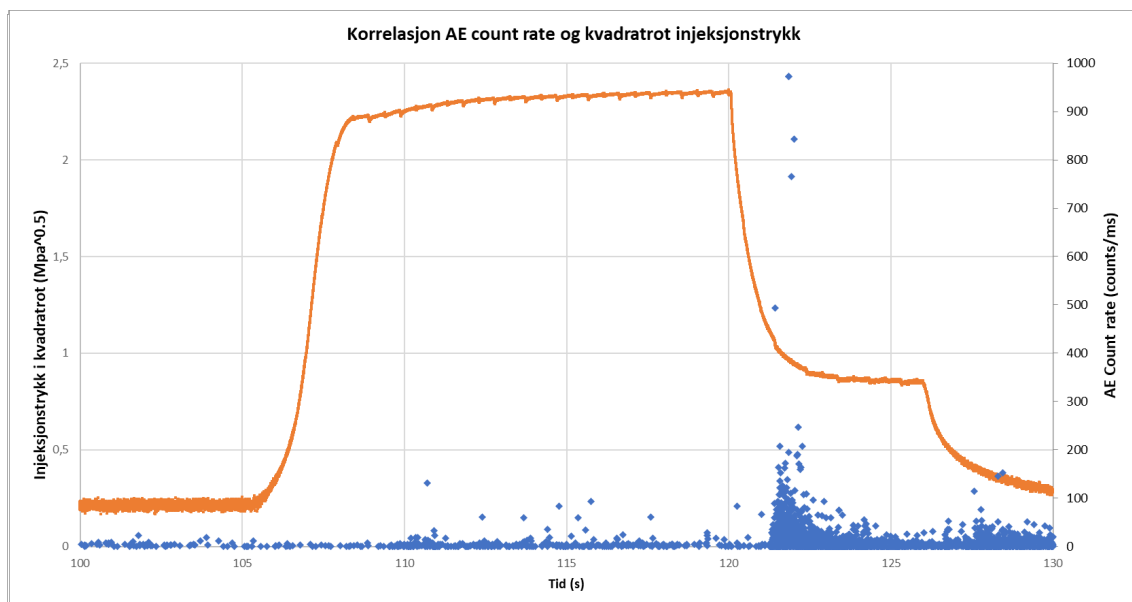
Figur H.8: $\frac{dt}{dP}$ mot injeksjonstrykket P i shut-in fasen for andre jekking under test 20200428141728. Tolket trykk ved lukking av sprekk er vist med grønn linje, mens lineær startfase er vist med rød linje.

Flowback tester

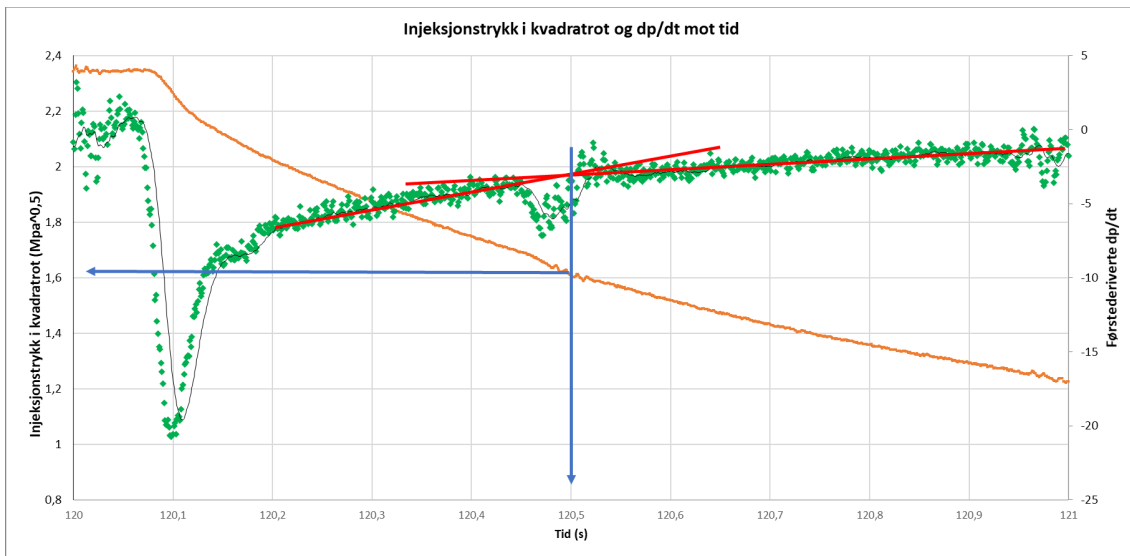
I.1 Flowback test 1

Data fra andre og tredje jekkesyklus under testnummer 20200221133901

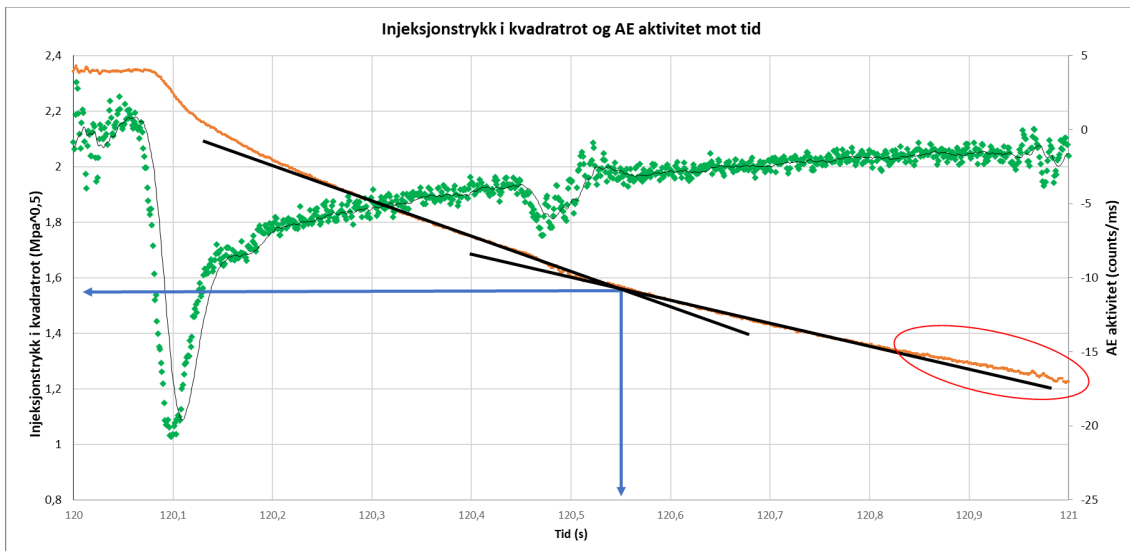
I.1.1 Andre jekking



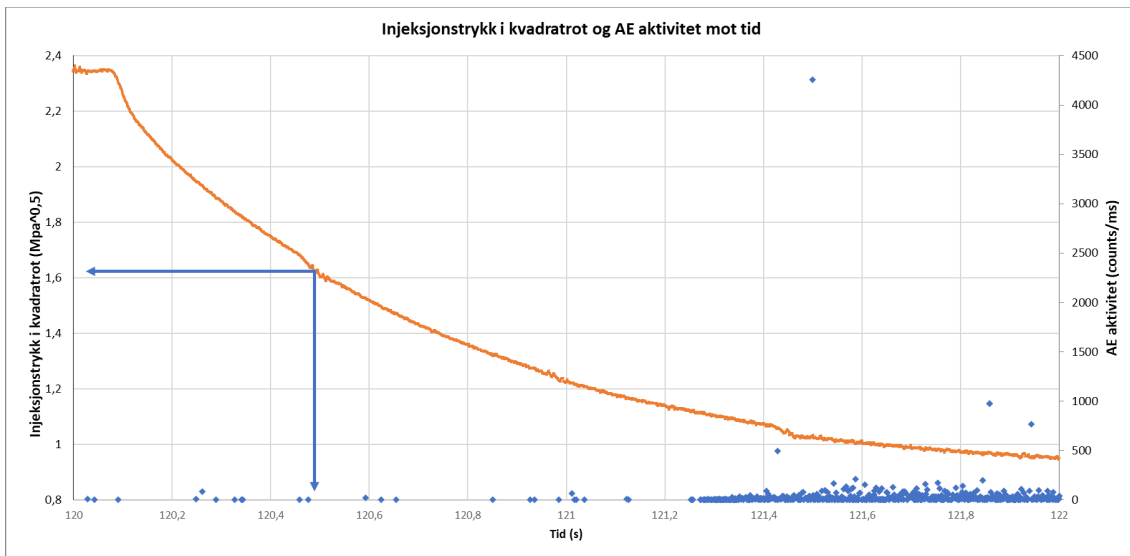
Figur I.1: Injeksjonstrykk i kvadratrot og AE aktivitet i andre jekkesyklus av testnummer 20200221133901. Tydelig endring i AE aktivitet ved 121 sekund.



Figur I.2: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av andre jekkesyklus i testnummer 20200221133901. Endring i den derivertes stigning er vist med to røde linjer som krysser hverandre. Krysningspunktet er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.

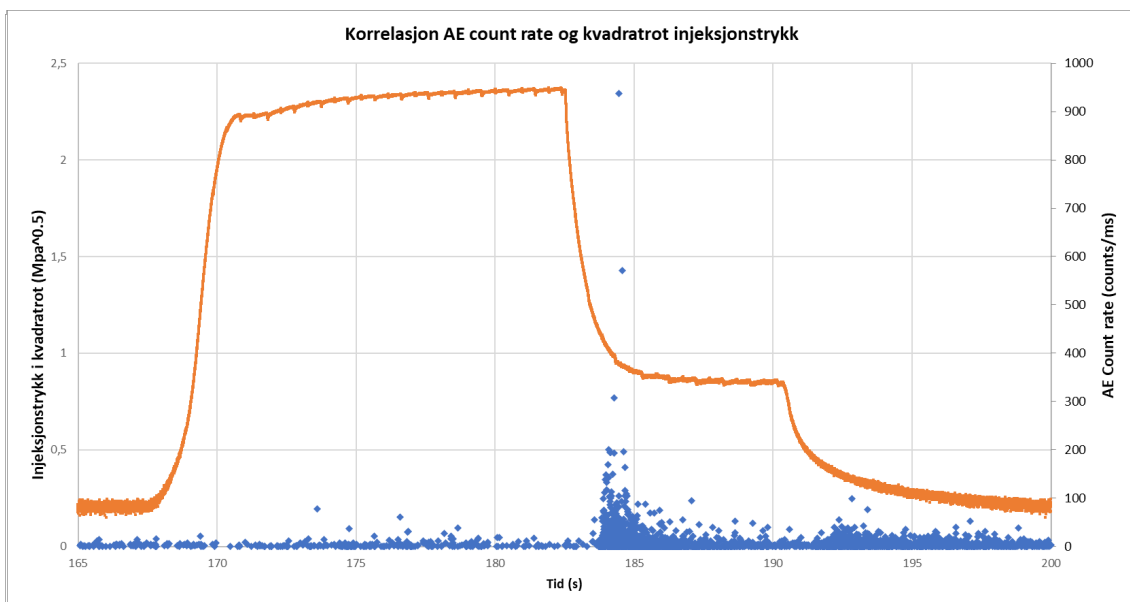


Figur I.3: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av andre jekkesyklus i testnummer 20200221133901. Et knekkpunkt i kvadratrotplottet av injeksjonstrykket er her tolket med to svarte linjer. Krysningspunktet for de svarte linjene er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer. Avvik fra linearitet er vist i rød sirkel.

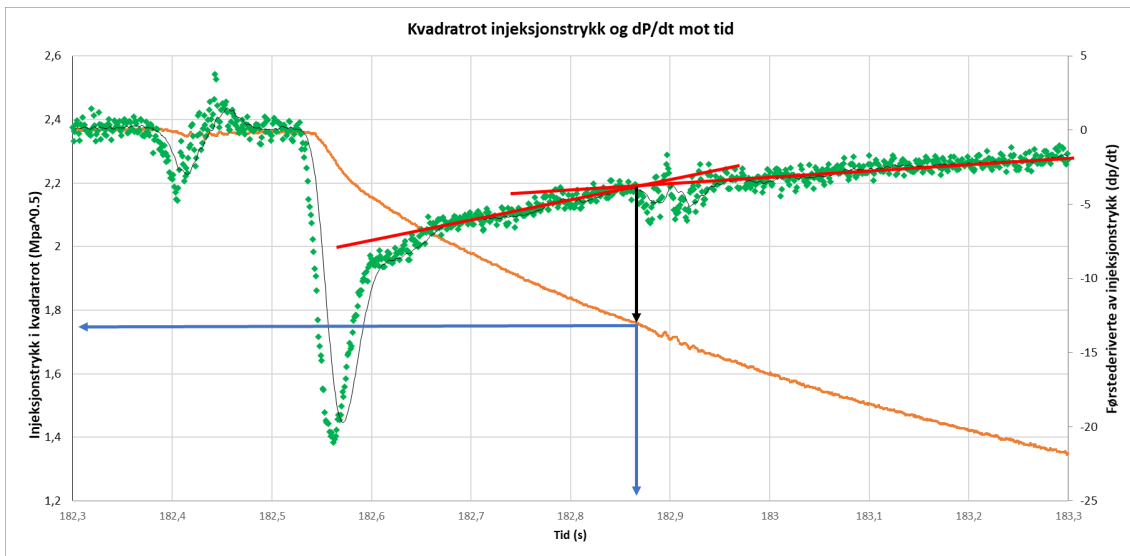


Figur I.4: Trykk og AE aktivitet under flowback fasen for andre jekkerunde under test 20200221133901. Distinkt AE aktivitet ved 121,3 sekund. De blå linjene viser den tidligere tolkningen av shut-in trykket i I.2

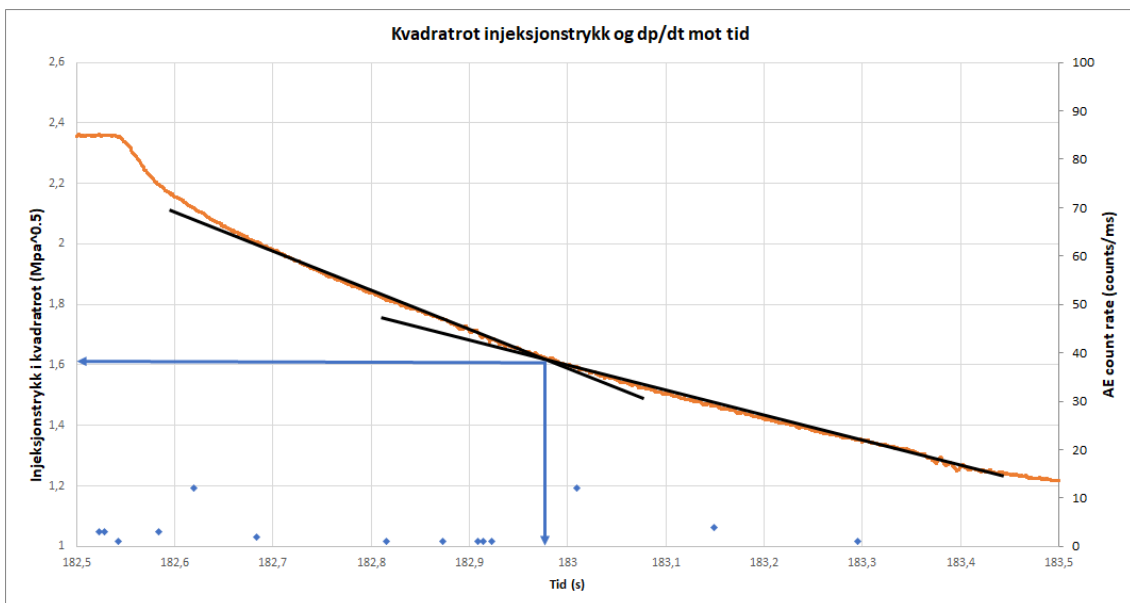
I.1.2 Tredje jekking



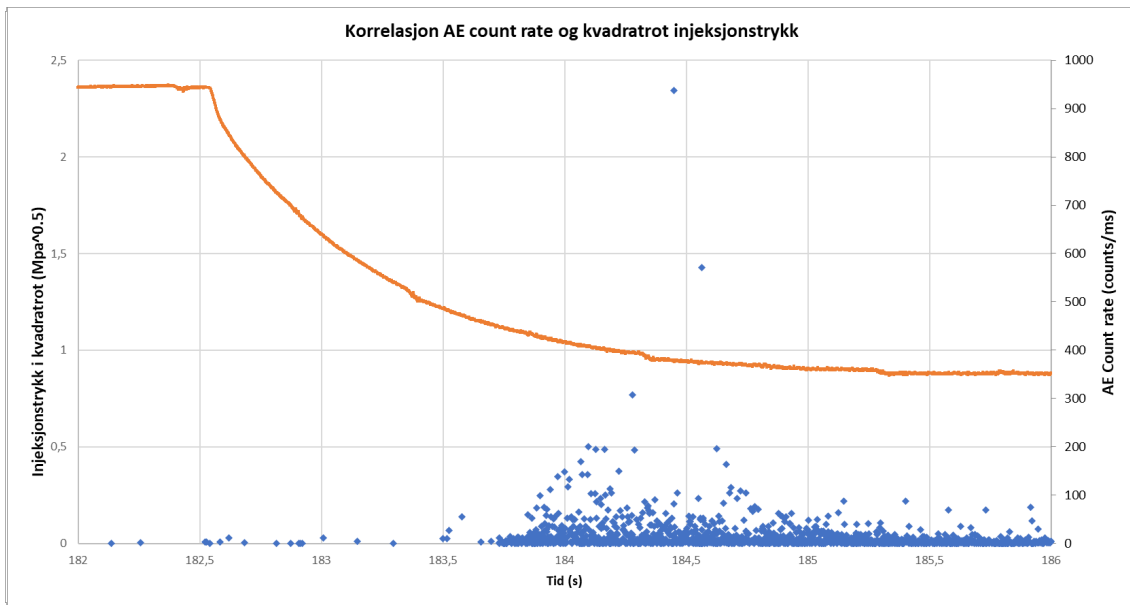
Figur I.5: Injeksjonstrykk i kvadratrot og AE aktivitet i tredje jekkesyklus av testnummer 20200221133901. Tydelig endring i AE aktivitet ved 184 sekund.



Figur I.6: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av tredje jekkesyklus i testnummer 20200221133901. Endring i den derivertes stigning er vist med to røde linjer som krysser hverandre. Krysningspunktet er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.



Figur I.7: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av tredje jekkesyklus i testnummer 20200221133901. Et knekkpunkt i kvadratrotplottet av injeksjonstrykket er tolket med to svarte linjer. Krysningspunktet for de svarte linjene er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.

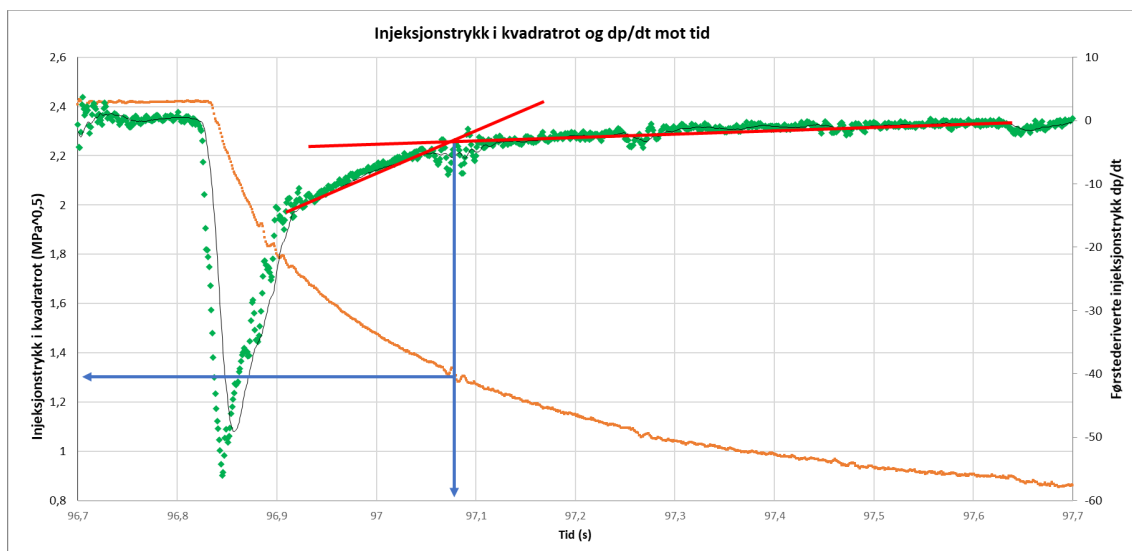


Figur I.8: Trykk og AE aktivitet under flowback fasen for tredje jekkerunde under test 20200221133901. Distinkt AE aktivitet ved 183,7 sekund.

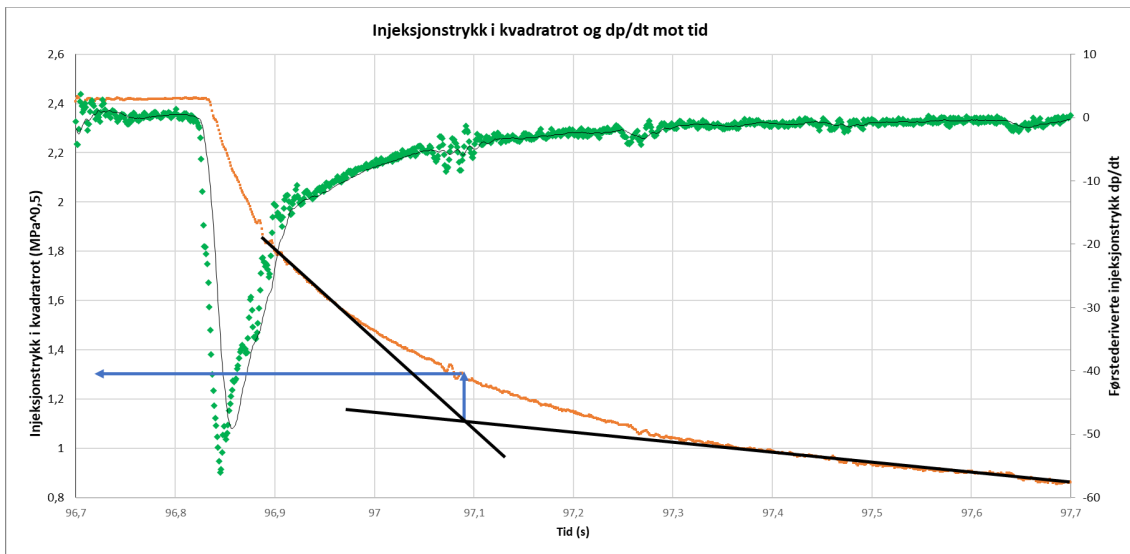
I.2 Flowback test 2

Data fra andre og tredje jekkesyklus under testnummer 20200309140146.

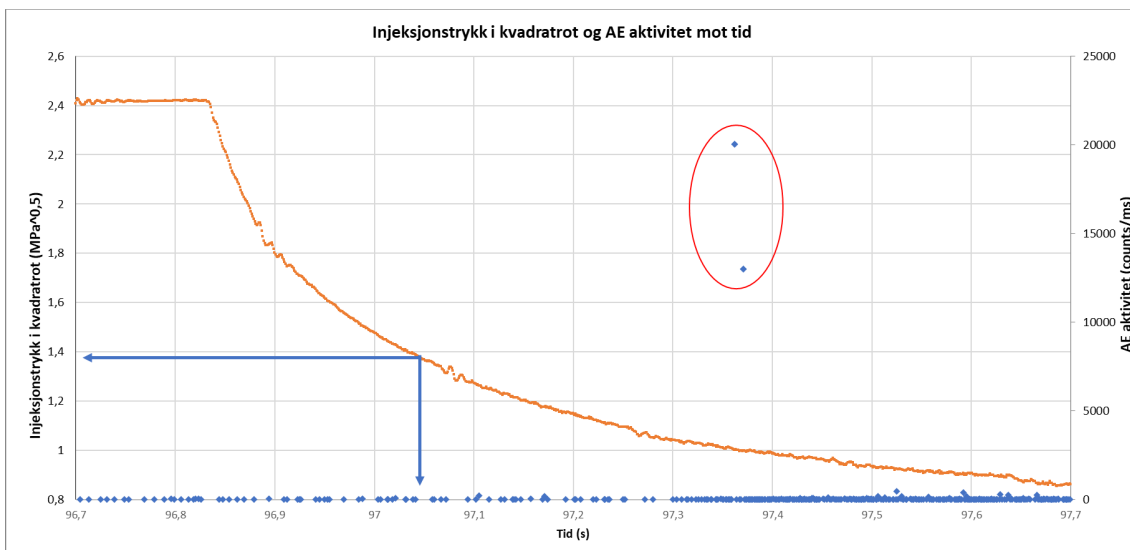
I.2.1 Andre jekking



Figur I.9: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av andre jekkesyklus i testnummer 20200309140146. Endring i den derivertes stigning er vist med to røde linjer som krysser hverandre. Krysningepunktet er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.

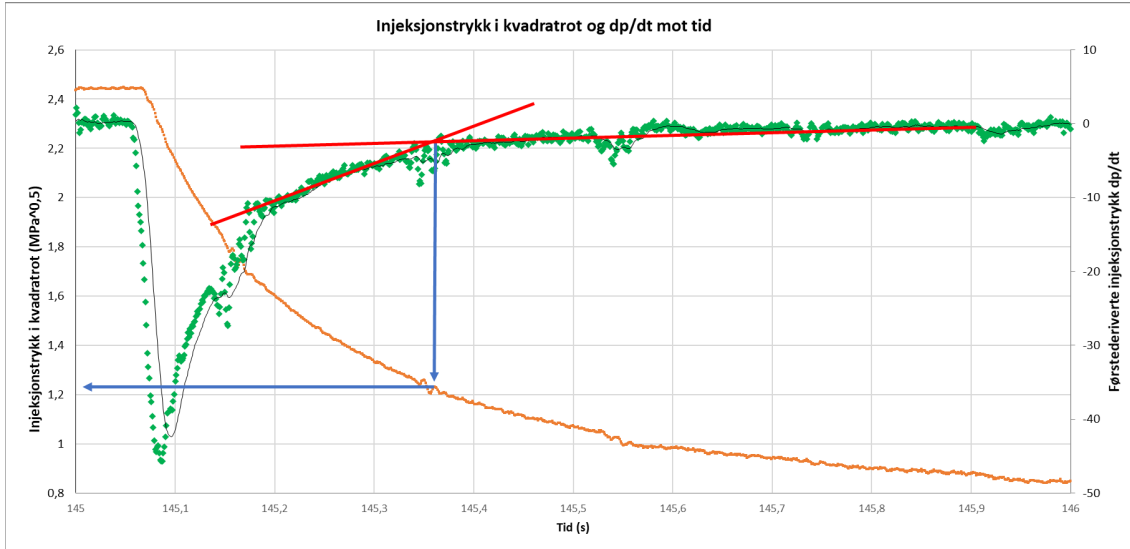


Figur I.10: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av andre jekksyklus i testnummer 20200309140146. Et knekkpunkt i kvadratrotplottet av injeksjonstrykket er her tolket med to svarte linjer. Krysningpunktet for de svarte linjene er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.

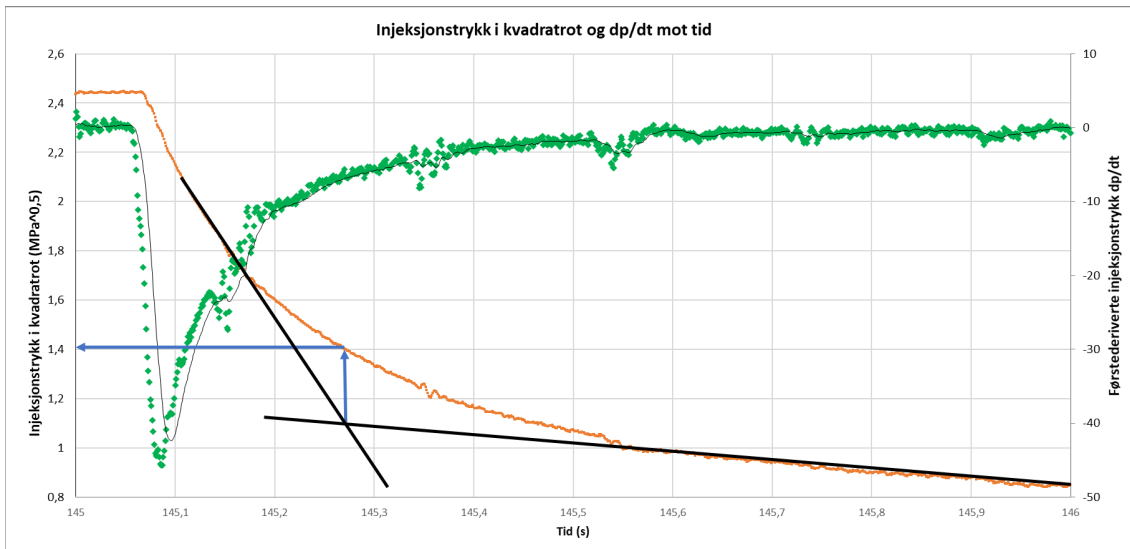


Figur I.11: Trykk og AE aktivitet under flowback fasen for andre jekkerunde under test 20200309140146. Distinkt AE aktivitet ved 97,36 sekund, markert med rød ring. De blå linjene viser den tidligere tolkningen av shut-in trykket i I.9

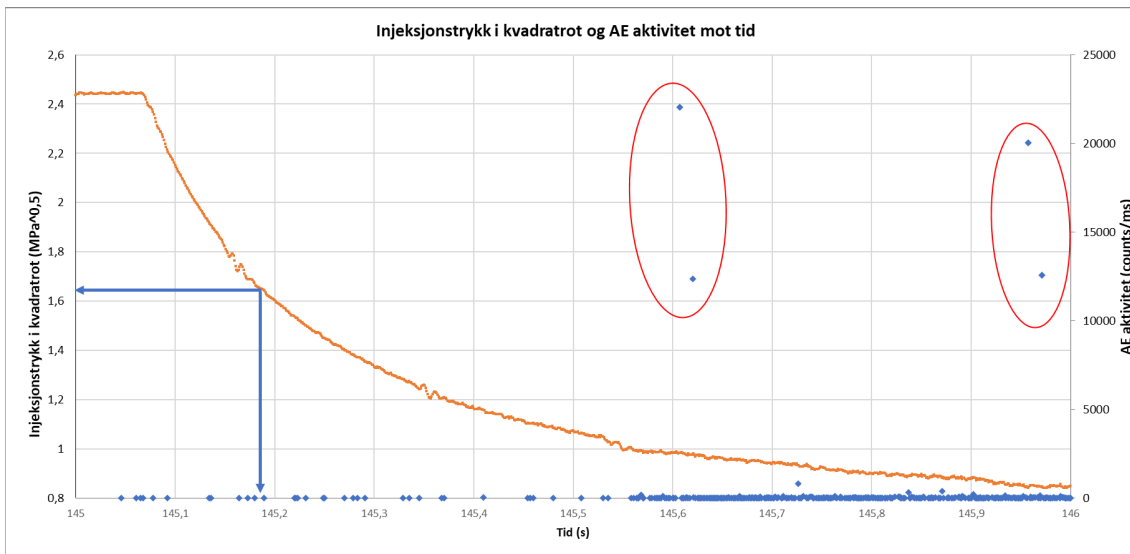
I.2.2 Tredje jekking



Figur I.12: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av tredje jekkesyklus i testnummer 20200309140146. Endring i den derivertes stigning er vist med to røde linjer som krysser hverandre. Krysningspunktet er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.



Figur I.13: Injeksjonstrykk i kvadratrot og den tidsderiverte under flowback av tredje jekkesyklus i testnummer 20200309140146. Et knekkpunkt i kvadratrotplottet av injeksjonstrykket er her tolket med to svarte linjer. Krysningspunktet for de svarte linjene er tolket som tidspunktet der shut-in trykket P_s inntreffer, markert med blå linjer.



Figur I.14: Trykk og AE aktivitet under flowback fasen for andre jekkerunde under test 20200309140146. Distinkt AE aktivitet ved 145,6 og 145,95 sekund, markert med røde ringer. De blå linjene viser den tidligere tolkningen av shut-in trykket i **I.12**.

