




GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·

Rapport nr.: 2016.023		ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)		Gradering: Konfidensiell til 31.12.2017	
Tittel: Geofysisk logging av 4 borehull i Ramså-feltet, Andøya, Nordland					
Forfatter: Harald Elvebakk, Marco Brønner, Jomar Gellein og Jan S. Rønning			Oppdragsgiver: NGU / Vegdirektoratet		
Fylke: Nordland			Kommune: Andøy		
Kartblad (M=1:250.000) Tromsø			Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1233 II Dverberg		
Forekomstens navn og koordinater: Ramså 33N 543800 E – 7674400 N			Sidetall: 61		Pris: kr 255.-
Feltarbeid utført: 08.09. - 12.09. 2015 24.02. - 27.02.2016		Rapportdato: 03.06.2016		Prosjektnr.: 329500	
				Ansvarlig: 	
Sammendrag: På nordøstlige Andøya på en ca. 6 km bred strandflate mellom Ramså og Skarstein ligger sedimenter av mesozoiske alder som de eneste bergarter av denne alder i Norge. Feltet er ca 8.4 km langt og består av bergarter fra nedre kritt og midtre/øvre jura. I NGU-prosjektet RABIS: <i>An integrated study of the Ramså basin on Andøya, northern Norway</i> , er det boret 4 hull i den sørlige delen av feltet. Hensikten med boringene er å få økt kunnskap om utvikling og tektonisk ramme av Ramså Bassenget og å kartlegge fordeling av forvitret grunnfjell som er blottet langs fjæra på den sørlige bassengkanten ved utløpet av Nordelva. Generell forvitring og spesielt dypforvitring er en viktig del av forundersøkelser for tunneler. Petrofysiske egenskaper som seismisk hastighet, resistivitet, magnetisk susceptibilitet og indusert polarisasjon (IP) kan alle påvirkes av forvittringsprosesser. For å bedre forstå hvordan disse egenskapene varierer i forvitret berg, ble de fire borehullene på Andøya logget geofysisk med støtte fra Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Det var da av spesiell interesse å se på overgangen fra de sedimentære bergartene til grunnfjell der det er påvist forvitring. Ideelt sett skulle alle de fire borehullene gå gjennom de mesozoiske sedimentære bergartene, gjennom en forvittringsone og ned i friskt grunnfjell. Ved logging skulle en derved få kunnskap om petrofysiske egenskaper relevant for tolking av forundersøkelser for tunneler og bergrom. Flere forhold påvirket gjennomføringen av loggeprosjektet: <ul style="list-style-type: none"> • Hullene ble boret bare ca. 10 m ned i grunnfjellet, og det er uklart om alle kom ned i ikke forvitret berg. • Bergartene i de fire borehullene var sterkt oppsprukket og dette hindret loggingen. Flere hull hadde rast, og det var ikke mulig komme til bunnen med alle sonder. • Porevannet var til dels meget salt og nær alle resistivitetmålinger ble påvirket av dette slik at måleverdiene ikke ble relevante for tunnelundersøkelser generelt. • Mineralogiske og kjemiske analyser av kjernematerialet er konfidensielle data ut 2017. Endelig korrelasjon mellom loggeparametre og geologi kan først sammenstilles når data frigis. Generelt kan en konkludere med at loggingen av borehullene ikke ga den kunnskapen en forventet på forhånd. Seismisk p-bølgehastighet ble målt til ca. 4000 m/s i forvitret berg noe som er lavere enn forventet i aktuelle bergart. Resistiviteten ble påvirket av salt porevann og viser verdier som er lite relevant for undersøkelser i tunnelprosjekt. Magnetisk susceptibilitet i grunnfjell viser til dels svært lave verdier i grunnfjell, men det er uklart om dette skyldes lavt magnetittinnhold i frisk bergart eller om det skyldes forvitring. Indusert polarisasjon (IP) viser ingen klare anomalier på leiromvandling i forvitret fjell. Undersøkelsen har imidlertid gitt mye kunnskap om de sedimentære bergartene i Ramsåfeltet.					
Emneord: Geofysikk		Borehullslogging		Seismisk hastighet	
Resistivitet		Indusert polarisasjon		Magnetisk susceptibilitet	
Temperatur		Vannets ledningsevne		Sprekkefrekvens	
Radioaktivitet				Fagrapport	

INNHold

1. INNLEDNING	9
2. MÅLEOMRÅDE OG BOREHULL	10
3. GEOLOGI OG DYPFORVITRING	11
4. MÅLEMETODE OG UTFØRELSE	13
4.1 Målemetoder og målte parametere.	14
5. RESULTATER	17
5.1 Resultater Bh 1	18
5.1.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh 1	18
5.1.2 Gammaspektrometri, innhold av U, Th og K, Bh 1.	20
5.1.3 Seismisk hastighet, Resistivitet, Magnetisk susceptibilitet, IP og SP, Bh 1	20
5.1.4 Akustisk televiver, sprekkekartlegging og beregning av foliasjon, Bh 1	23
5.2 Resultater Bh2	28
5.2.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh 2.	28
5.2.2 Gammaspektrometri, innhold av U, Th og K, Bh 2.	30
5.2.3 Seismisk hastighet, resistivitet, magnetisk susceptibilitet, IP og SP, Bh 2	32
5.2.4 Akustisk televiver, sprekkekartlegging og beregning av foliasjon, Bh 2	34
5.3 Resultater Bh 3	40
5.3.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh3.	40
5.3.2 Gammaspektrometri, innhold av U, Th og K, Bh 3.	42
5.3.3 Seismisk hastighet, Resistivitet, Magnetisk susceptibilitet, IP og SP, Bh 3	42
5.3.4 Akustisk televiver, sprekkekartlegging og beregning av foliasjon, Bh 3	45
5.4 Resultater Bh 4	51
5.4.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh4.	51
5.5 Ovalisasjon og borehulldiameter, caliper 4, med akustisk televiver.	53
5.5.1 Ovalisasjon og Caliper4, Bh1	54
5.5.2 Ovalisasjon og Caliper4, Bh 2.....	56
5.5.3 Ovalisasjon og Caliper4, Bh 3.....	59
6. OPPSUMMERING	61
7. REFERANSER	62

FIGURER

Figur 2.1. Oversiktskart over Andøya (øverst) og Ramsåfeltet (nederst) med borehullene plottet inn. Til høyre boring av Bh 1.	10
Figur 3.1. Geologisk kart over Ramsåformasjonen, Andøya (Midbøe 2007).	12
Figur 3.2. Prinsippskisse av dypforvitring (etter Brantley et al 2007).	13
Figur 5.1. Geologisk kart over Ramså-formasjonen med plassering av Bh1, Bh2, Bh3 og Bh4. Foliaasjonens strøk- og fallretning i borehullene er angitt (fra akustisk televiwer). P1 og P2 angir plassering av to resistivitetsprofiler (se Olesen et al. 2012)	17
Figur 5.2. Logging i Bh 1 (venstre). Til høyre trekkes resistivitetssonden løs med traktor etter å ha satt seg fast i rassone på ca 150 m dyp.	18
Figur 5.3. Bh 1, temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total naturlig gammastråling og beregnet temperaturgradient.	19
Figur 5.4. Bh 1, Total gamma, U, Th og K-innhold målt ved gammaspektrometri.	21
Figur 5.6. Bh 1, 9 – 85 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølge hastighet.	24
Figur 5.7. Bh 1, 85 – 140 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølge hastighet.	25
Figur 5.8. Sprekker i Bh 1. Rosediagram fallretning (venstre) og fallvinkel (høyre).	26
Figure 5.9. Foliaasjon i Bh 1. Fallretning og fallvinkel (venstre), borehullsforløp med fallvinkel (høyre).	26
Figur 5.10. Bh 1. Akustisk bilde fra mesozoiske sediment, 68 – 72 m (venstre), og oppsprukket grunnfjell 127 – 131 m (høyre).	27
Figur 5.11. Lokasjon Bh 2 langs ”Fjellveien”	28
Figur 5.12. Bh 2, temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total naturlig gammastråling og beregnet temperaturgradient.	29
Figur 5.13. 2D resistivitet som viser grensen mellom de sedimentære bergartene (Skarsteinformasjonen blå, grønn), og grunnfjell (rød, brun). Inntegnet borehull, Bh 2, viser indikert fallvinkel på sedimentene (fra Olesen et al. 2012)	30
Figur 5.14. Bh 2, Total gamma, U, Th og K-innhold målt med gammaspektrometri.	31
Figur 5.15. Bh 2. Seismisk hastighet, resistivitet, magnetisk susceptibilitet, IP og SP.	33
Figur 5.16. Rosediagram over indikerte sprekker i Bh 2 (venstre) og fallvinkel (høyre).	34
Figur 5.17. Bh 2, 30 – 90 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølge hastighet.	35
Figur 5.18. Bh 2, 90 – 150 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølge hastighet.	36
Figur 5.19. Bh2, 150 – 215 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølge hastighet.	37
Figur 5.20. Foliaasjon i Bh2. Fallretning og fallvinkel (venstre), borehullsforløp med fallvinkel (høyre).	38
Figur 5.21. Akustisk bilde Bh 2, 112-115 m i sedimentære bergarter (venstre) og 201-204 m i grunnfjell (høyre).	39
Figur 5.22. Logging i Bh 3.	40
Figur 5.23. Bh 3 temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total naturlig gammastråling og beregnet temperaturgradient.	41

Figur 5.24. Bh 3, Total gammastråling, U, Th og K-innhold målt ved gammaspektrometri...	43
Figur 5.25. Bh 3. Seismisk hastighet, total gammastråling, magnetisk susceptibilitet, resistivitet, IP og SP.	44
Figur 5.26. Rosediagram over indikerte sprekker i Bh 3 (venstre) og fallvinkel (høyre).	45
Figur 5.27. Bh 3, 15 – 85 m. Individuelle sprekker, sprekkefrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P-bølgehastighet.	46
Figur 5.28. Bh 3, 85 – 155 m. Individuelle sprekker, sprekkefrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølgehastighet.	47
Figur 5.29. Bh 3, 155 – 222 m. Individuelle sprekker, sprekkefrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølgehastighet.	48
Figur 5.30. Foliasjon i Bh 3. Fallretning og fallvinkel (venstre), borehullsforløp med fallvinkel (høyre).	49
Figur 5.31. Bh 3. Akustiske bilder fra 36-39 m, 77-80 m og 129-132 m dyp. Kalsittbånd 130.5 – 131.5 m.	50
Figur 5.32. Boring av Bh 4 sør for gammel militærleir på Ramså.	51
Figur 5.33. Bh 4. Temperatur, total gammastråling, elektrisk ledningsevne i vann, resistivitet i berg og beregnet temperaturgradient.	52
Figur 5.34. Laboratorietest som viser avskalling i borehull vinkelrett på største spenningsretning. Laboratorieforsøk foretatt ved CSIRO, Avdeling for bergmekanikk. (Fra Plumb & Hickman 1985).	53
Figur 5.35. Ovalisasjonslogg for Bh1. Sprekkesone ved 127-128 m vises tydelig på akustisk bilde.	54
Figur 5.36. Caliper4-logg (diameter) og total gammalogg, Bh 1.	55
Figur 5.37. Ovalisasjonslogg for Bh2.	57
Figur 5.38. Caliper4-logg (diameter) og total gammalogg, Bh 2.	58
Figur 5.39. Ovalisasjonslogg for Bh3.	59
Figur 5.40. Caliper4-logg (diameter) og total gammalogg Bh 3.	60

TABELLER

Tabell 1. Borehullsdata, koordinater i WGS84, UTM sone 33W.	11
Tabell 2. Målte parametere med loggehastighet og samplingstetthet.	13

1. INNLEDNING

NGU har gjort geofysisk logging i 4 borehull i Ramsåfeltet på Andøya i Nordland. Boringen av hullene var en del av NGU-prosjektet RABIS: *An intergrated study of the Ramså basin on Andøya, northern Norway*. Borehullsloggingen er utført som en del av Forforut-prosjektet, et samarbeidsprosjekt med Vegdirektoratet og omhandler forundersøkelser ved tunnelarbeid.

Hensikten med RABIS prosjektet var å få økt kunnskap om utvikling og tektonisk ramme av Ramså Bassenget som består av sedimentære bergarter, og å kartlegge fordeling og studere karakter av forvitret grunnfjell som er blottet langs fjæra på den sørlige bassengkanten ved utløpet av Nordelva. Ved RABIS-prosjektet er det foretatt omfattende geofysiske målinger både fra helikopter og på bakken, og de petrofysiske egenskapene målt i borehull vil bidra til en bedre tolking av disse

Generell forvitring og spesielt dypforvitring er en viktig del av forundersøkelser for tunneler. Petrofysiske egenskaper som seismisk hastighet, resistivitet, magnetisk susceptibilitet og induert polarisasjon (IP) kan alle påvirkes av forvitningsprosesser. For å bedre forstå hvordan disse egenskapene varierer i forvitret berg, ble de fire borehullene på Andøya logget geofysisk. Det var da av spesiell interesse å se på overgangen fra de sedimentære bergartene til grunnfjell der det er påvist forvitring.

Alle brønnene ble boret innenfor den sørlige delen av Ramsåfeltet. Bh 1 ble boret i nærheten av en rapportert brønn fra 1896 og i samme området som har vært en aktiv kullgruve (se figur 2.1). Geologien er beskrevet som en pålapp av sedimentære bergarter med fall nordover mellom 22°-30° (Reusch 1903). For å påtreffe de sedimentære lag vinkelrett ble hullet boret med 25° mot sør. Bh 2 ligger ved vestlige kant og ble boret med 30° mot vest for å bore gjennom forkastninger som er beskrevet fra geologisk kart (Dalland 1974). Bh 3 ble boret sørvest i området, Kvalnesmyra, utenfor det som til nå har vært definert som grensen mellom de sedimentære bergartene og grunnfjell. Grunnen til dette var at gravimetrisk, magnetiske og elektromagnetiske data viste at sedimentbassenget gikk lenger sørvest enn tidligere antatt. Bh 4 ble boret ca 270 m sør for Bh 1 i den hensikt å kartlegge grensen til grunnfjell samt at det i nærheten var observert dypforvitring i dagen. I dette hullet ble det gjort kun to logger da resistivitetssonden satte seg fast i bunnen av hullet på 52 m dyp. Forsøk på å trekke sonden opp medførte at vaieren løsnet i kontakten på sonden og sonden gikk tapt.

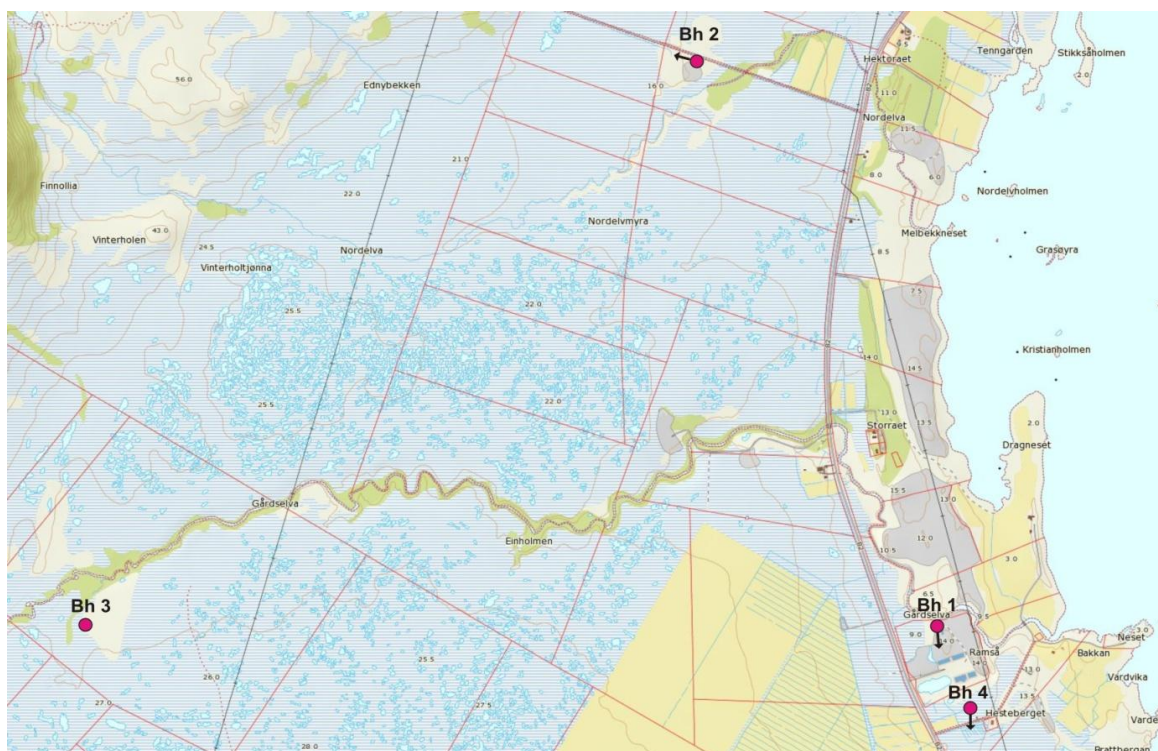
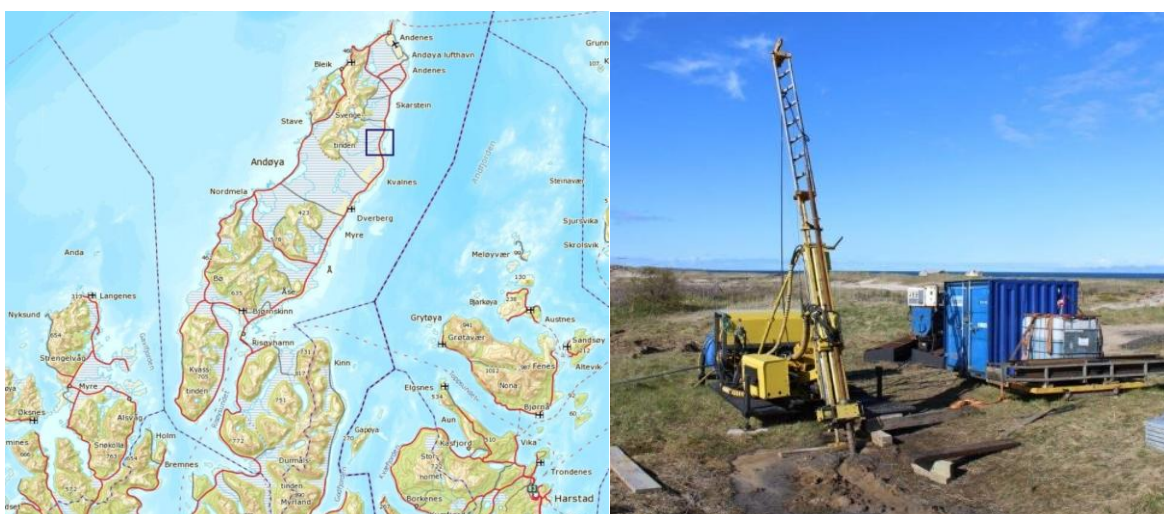
En rekke geofysiske parametre er logget: resistivitet, seismisk hastighet, temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total gammastråling, gammaspektrometri, magnetisk susceptibilitet, induert polarisasjon (IP) og selvpotensial (SP). I tillegg ble hullene logget med akustisk televiwer for å kartlegge oppsprekking og foliasjon mot dypet.

I denne rapporten beskrives foliasjonen i bergartene. I de sedimentære bergartene skulle dette vært beskrevet som lagdeling.

Loggingen ble utført i perioden 08.09. – 12.09.2015 og 24.02. – 27.02.2016 av Harald Elvebakk og Jomar Gellein.

2. MÅLEOMRÅDE OG BOREHULL

Figur 2.1 viser oversiktskart med borehullene plottet inn. Hullene er boret i mesozoiske bergarter mellom Ramså og Skarstein på østkysten av Andøya. Bh 1 og Bh 2 var lett tilgjengelig med bil. Boring og logging av Bh 3 måtte gjøres på vinteren da myra var frosset og gjorde det mulig å transportere borerigg til boreplassen. I Bh 1 var det gått ras mellom 140 og 150 m slik at de nederste 50 -60 m ikke ble logget. En sonde satte seg fast og måtte trekkes løs med traktor. I Bh 2 ble hele hullet logget, men ikke alle sondene gikk helt i bunnen. Tabell 1 viser data for hullene.



Figur 2.1. Oversiktskart over Andøya (øverst) og Ramsåfeltet (nederst) med borehullene plottet inn. Til høyre boring av Bh 1.

Tabell 1. Borehullsdata, koordinater i WGS84, UTM sone 33W.

Bh	Øst	Nord	m.o.h.	Dyp	Fall	Retning	Diam	Logget dyp
Bh 1	543036	7674280	10	203.5 m	66	N180	76 mm	142-157 m
Bh 2	542206	7676280	15	217.5 m	60	N290	76 mm	201-215 m
Bh 3	540102	7674290	26	225 m	90	lodd	76 mm	220-223 m
Bh 4	543149	7674013	9	53.7 m	65	N 180	76 mm	51.5 m

3. GEOLOGI OG DYPFORVITRING

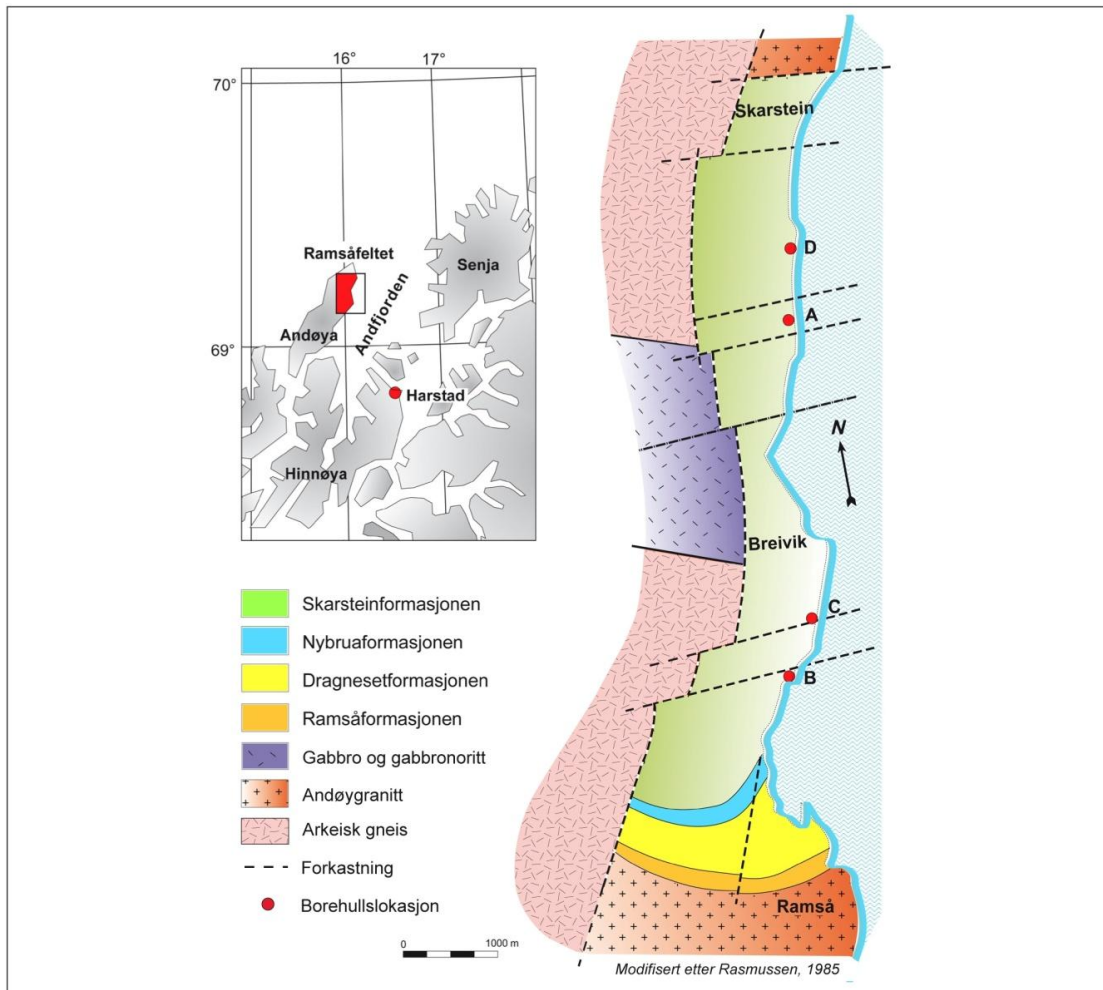
På nordøstlige Andøya på en ca. 6 km bred strandflate mellom Ramså og Skarstein ligger sedimenter av mesozoisk alder som de eneste bergarter av denne alder i Norge. Feltet er ca 8.4 km langt og består av bergarter fra nedre kritt, Skarsteinformasjonen, og midtre/øvre jura, Ramsåformasjonen (Dalland 1975), se geologisk kart figur 3.1. Feltet har vært gjenstand for omfattende geologiske undersøkelser og boringer etter at det ble funnet kull i 1867. Det har vært forsøkt gruvedrift på kullet i flere omganger uten at de store forekomster ble funnet. I 50-årene ble det forsøkt drift på oljeskifer som ble benyttet til bygningsstein. I 1972 ble det gjort seismiske undersøkelser og nye kjerneboringer langs fjæra med tanke på oljeforekomster, men det ble aldri funnet olje (Nilssen 2005).

På den sørlige bassengkanten ble det observert en ca 30 m bred blotning av forvitret grunnfjell, som ble påtruffet ved boring lengre nord under de sedimentære bergartene. Generell forvitring og dypforvitring er et fenomen som er blitt satt på dagsorden de siste 10 - 15 årene i forbindelse med tunnelbygging. Mange av problemene med dårlig fjell har i mange tilfeller vist seg å være knyttet til dypforvitring.

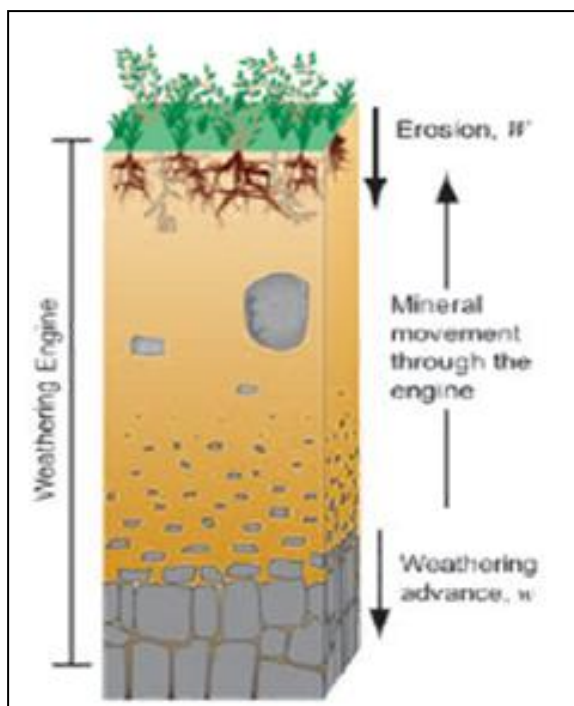
Dypforvitring av grunnfjell er en prosess som i dag er mest kjent fra ekvatoriale strøk med varmt og fuktig klima. I mesozoikum (kritt, jura, trias) hadde Norge et subtropisk klima og dypforvitring har mest sannsynlig vært en vanlig prosess flere steder i Norge. Surt vann trengte ned i krystalline bergarter via sprekker. Over tid førte dette til at fjellet forvitret med dannelse av grus og leire. Siden ble disse bergartene overlappet av sedimenter og det forvitrede fjellet ble bevart i dypet slik tilfellet er på Andøya. Påfølgende landheving førte til erosjon av sedimentene og istider førte til ytterlig erosjon og nedtæring av de sedimentære lagene. Soner med dypforvitret fjell kan i dag observeres både dagnært og i dypet der sedimentene er erodert bort. Ved nedbryting av silikatmineraler (i krystalline bergarter) blir de magnetiske egenskapene endret ved at magnetitt og hematitt omdannes til jernhydroksider (rust) som har lavere magnetisk susceptibilitet (Olesen & Rønning 2008). Ved å kartlegge de magnetiske egenskapene på overflaten og sammenstille disse med depresjoner i terrenget har NGU laget aktsomhetskart for tunnelplanlegging. Dette er gjort for Østlandsområdet (Olesen 2006, Olesen et al. 2007). Dette kartet er senere oppdatert to ganger (Barandwal & Olesen 2012 og 2016).

Oppknusing og omvandling av fjellet førte også til lavere tetthet og en redusert seismisk hastighet og ikke minst lavere resistivitet i forhold til det opprinnelige grunnfjellet. Siden prosessen går over tid og går gradvis fra overflaten og nedover, ligger de mest forvitrede bergarter øverst og viser andre fysiske egenskaper enn i dypet, som vanligvis har en mindre forvitningsgrad, se figur 3.2. Generelt sett er de mest forvitrede bergarter leirrike og muligens

ganske tett, mens de som er mindre forvitret viser en mer grusig og mer porøs struktur og det er det vi finner mest i Norge i dag. Indusert polarisasjon (IP) kan påvise leirmineraler.



Figur 3.1. Geologisk kart over Ramsåformasjonen, Andøya (Midbøe 2007).



Figur 3.2. Prinsippkisse av dypforvitring (etter Brantley et al 2007).

4. MÅLEMETODE OG UTFØRELSE

Det er benyttet loggeutstyr produsert av Robertson Geologging ltd. (<http://www.geologging.com>).

Metodebeskrivelse for NGU's målesonder ligger på NGU's hjemmesider på følgende link: <http://www.ngu.no/emne/borhullsgeofysikk>

Tabell 2 viser loggehastighet og samplingstetthet for de ulike målesondene.

Tabell 2. Målte parametere med loggehastighet og samplingstetthet.

Målt parameter	Loggehastighet	Samplingstetthet
Temperatur	3 m/min	1 cm
Ledningsevne i vann	3 m/min	1 cm
Naturlig total gammastråling	3 m/min	1 cm
Gammaspektrometri, U, Th, K	1 m/min	1 cm
Resistivitet i fjell, SP	5 m/min	1 cm
Seismisk hastighet	4 m/min	1 cm
Magnetisk susceptibilitet	5 m/min	1 cm
Indusert Polarisasjon	5 m/min	1 cm
Akustisk televiewer (HIRAT)	3 m/min	1 mm
Borehullsavvik (fra HIRAT)	3 m/min	1 cm

4.1 Målemetoder og målte parametere.

Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total naturlig gammastråling måles med samme sonde. Gammastråling måles i cps er tilpasset API-standard, og data kan sammenlignes med data målt med andre sensorer med samme standard.

Gammaspektrometri. Sonden måler innholdet av kalium (%), uran (ppm) og thorium (ppm). Total naturlig gammastråling (API standard) måles også. Det kan gjøres en kontinuerlig logg med loggehastighet 1 m/min, eller det kan tas punktmålinger i 5 – 6 minutter for å kartlegge hele energispekteret for mer nøyaktig konsentrasjonsbestemmelse. Innholdet av K, U og Th i dette punktet beregnes.

Resistivitet i berget måles med to forskjellige elektrodekonfigurasjoner, Long Normal (LN) og Short Normal (SN). Dette er to pol-pol konfigurasjoner med elektrodeavstand henholdsvis 1,6 og 0,4 m. Fjern potensialelektrode plasseres på bakken mens loggwire 10 m over sonde utgjør fjern strømelektrode. Resistiviteten er korrigert for vannets ledningsevne i borehullet, borehulldiameter og sondens størrelse (diameter) (Thunhead & Olsson 2004). Sonden måler også total gammastråling og selvpotensial (SP).

Ut fra vannets ledningsevne og resistiviteten i berget kan tilsynelatende porøsitet beregnes. Til dette benyttes en modifisert versjon av Archie's lov (Archie 1942). Tilsynelatende porøsitet Φ kan finnes ut fra følgende sammenheng:

$$\sigma = a \cdot \sigma_w \cdot \Phi^m + \sigma_s$$

σ = ledningsevne i bergarten

σ_w = ledningsevne i porevannet

σ_s = ledningsevne på kornoverflate

Faktorene a og m (kornform, sementeringsfaktor) er avhengig av bergartstype og bestemmes ved laboratoriemålinger. Ved beregningen av porøsiteten for krystalline bergarter brukes $a=1.928$ etter Thunehed og Olsson (2004). Verdien på m er satt lik 2.0 (personlig meddelelse Hans Thunehed). σ_s er satt lik 10^{-5} og er så godt som neglisjerbar. Det meste av borehullene på Andøya går i sedimentære bergarter, og verdiene for a og m passer trolig ikke for disse. Den beregnede verdi må derfor betraktes som en **tilsynelatende porøsitet**. En stor feilkilde ved denne tilpasningen vil være tilstedeværelsen av elektronisk ledende mineraler (grafitt, sulfider, oksider). Opptrer disse mineralene kan ikke Archie's lov benyttes til beregning av porøsitet.

Selvpotensial (SP) måles som en integrert del i resistivitetssonden og er et naturlig potensial som settes opp i undergrunnen over (massive) sulfidmalmer og grafitt (elektronledende mineraler). Strømmende vann kan også gi SP-anomalier.

Lydhastigheten beregnes ved å måle gangtiden til en utsendt lydimpuls. Sonden har tre mottakere med 20 cm avstand. Det blir gjort en måling for hver cm nedover i borehullet. Prosessering er gjort med programvaren WellCad fra det nederlandske firmaet Advanced Logic Technology (ALT 2006). Det beregnes P-bølgehastighet og S-bølgehastighet. Gangtiden til S-bølgen kan være vanskelig å avlese og det er knyttet noe usikkerhet til beregning av S-bølgehastigheten. En nedgang i lydhastighet kan bety oppsprukket/forvitret fjell.

Indusert Polarisasjon (IP) måles ved at strømpulser sendes ned i undergrunnen. Strømmen slås på og av, og i av-tiden måles en spenning (decay-kurve) som er avhengig av mengden elektronisk ledende mineraler. Forholdet mellom målt IP-spenning og spenning i strømtiden er et mål for IP-effekten som uttrykkes i prosent (%). Metoden er spesielt egnet for impregnasjonsmalmer. Høy IP og lav resistivitet tyder på ledende mineraler, men en kan også ha forhøyet IP uten lav resistivitet. Måling i borehull over gode ledere med høy elektronisk ledningsevne kan gi svært høye IP verdier. Dette er "falske" anomalier og skyldes at strømmen blir tilnærmet kortsluttet mellom elektrodene på sonden med svært lite spenningsfall. Ved IP-målinger sendes strømpulser på 110 ms (+/-) ned i bakken (borehullsveggen) med et opphold på 110 ms mellom pulsene.

Magnetisk susceptibilitet er et mål for magnetiserbarheten av et materiale. Det er en ubenevnt størrelse som viser forholdet mellom induert magnetfelt og påtrykt, ytre magnetfelt i et materiale. Størrelsen oppgis i SI enheter. Det mest magnetiske mineralet er magnetitt som har en susceptibilitet på 0.5 - 1.5 SI. Det er veldig stor forskjell på magnetitt og andre mineraler og ofte brukes $SI \cdot 10^{-5}$. Andre magnetiske mineraler er magnetkis (0.05 – 0.5) og ilmenitt (0.03 – 0.3).

Akustisk televiwer gir et bilde av innvendig borehullsvegg ved å prosessere gangtid og amplitude til en reflektert lydimpuls. Ved å digitalisere bildet kan en identifisere og beregne sprekkes fall og retning (Robertsson Geologging 2004). Sprekkefrekvens kan ut fra dette beregnes fortløpende langs hullet.

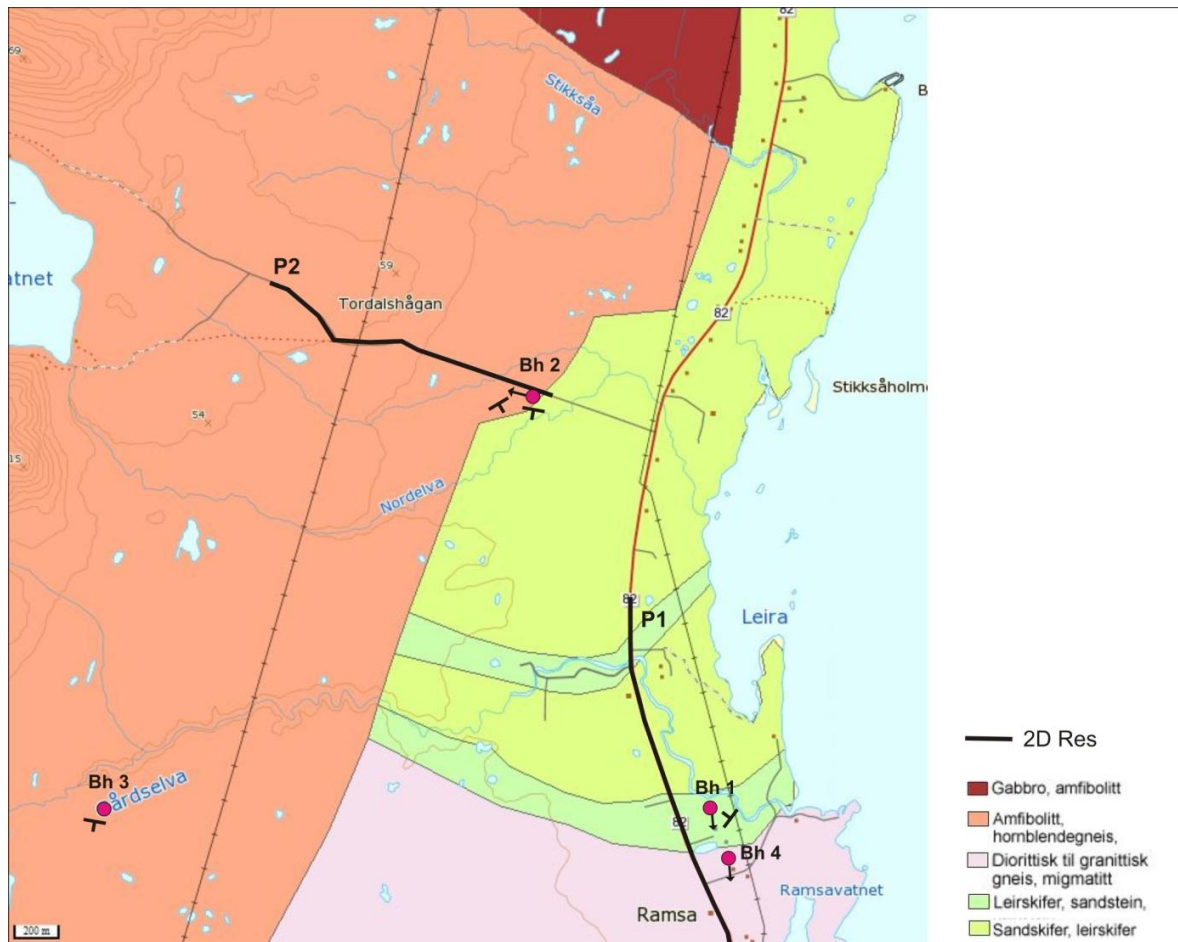
Fra akustisk televiwer-data beregnes en ovalisasjonslogg og en caliper4 logg. Disse logger er basert på endringer i borehulldiameter som skyldes sprekker og "breakouts" i borehullet. Ovalisasjonslogg kan også si noe om bergspenninger i hullet med retning til største hovedspenning, se senere kapittel 4.2, akustisk televiwer og ovalisasjonslogg.

Foliasjonen (fallretning og fallvinkel) er presentert i tabell og i grafisk plott som viser variasjon av fallretning og fallvinkel nedover hullet. Alle sprekker og sprekkesoner er digitalisert med beregning av strøk og fall. Der det er mulig er det beregnet tykkelse (åpning) av sprekken. Prosesserte data er presentert som sprekkestereogram og sprekkefrekvens-histogram.

Borehullsavvik måles med egen sonde eller som en integrert del av akustisk eller optisk televiwer. Det måles fallvinkel og retning til hullet. Retningen måles med et 3-aksialt magnetometer. Dette gir feil data i foringsrør og i magnetiske bergarter. Fallvinkel måles med 3-aksialt akselerometer og er ikke påvirket av magnetisme.

5. RESULTATER

Figur 5.1 viser geologisk kart over Ramså-formasjonen. Hullene ble boret for å kartlegge dyp til grunnfjell, Bh 1 og Bh 4 mot sør, Bh 2 mot nordvest og Bh 3 mot sørvest. Bh 3 er boret utenfor til nå kjente geologiske grense mellom sedimentære bergarter og grunnfjell, men geofysiske målinger (gravimetri, magnetometri og resistivitet fra helikopter EM) har vist at sedimentene kan ha større utstrekning mot sør og vest.



Figur 5.1. Geologisk kart over Ramså-formasjonen med plassering av Bh1, Bh2, Bh3 og Bh4. Foliasjonens strøk- og fallretning i borehullene er angitt (fra akustisk televiwer). P1 og P2 angir plassering av to resistivitetsprofiler (se Olesen et al. 2012)

I det følgende presenteres logger for de forskjellige målte parametre, temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total naturlig gammastråling, gammaspektrometri (U, Th og K-innhold), resistivitet i fjell, seismisk hastighet, magnetisk susceptibilitet, selvpotensial (SP) og industert polarisasjon, IP. I tillegg er det logget med akustisk televiwer som kartlegger oppsprekking og foliasjonen i borehullene. Bh 1, 2 og 3 er også avviksmålt.

Detaljerte data fra litologisk og stratigrafisk logging samt geokjemiske og mineralogiske undersøkelser av kjernene er konfidensielle ut 2017, og alle resultater vil bli publisert i Norsk Geologisk Tidsskrift (NGT) innen den tid. Etter den tid er data frigit. Dyp til grunnfjell er kartlagt med boring og logging, og overnevnte undersøkelser har vist om det er påvist forvitring i grunnfjell. Dette omtales senere.

5.1 Resultater Bh 1

I Bh1 var det gått ras mellom 140 og 150 m dyp. En kom likevel ned med den ene sonden (TCN) som måler temperatur, ledningsevne i vann og total naturlig gammastråling. De andre sondene ble målt til 140 -150 m dyp. Resistivitetssonden satte seg fast i borehullet. Den måtte trekkes løs ved hjelp av traktor, se figur 5.2. Dette resulterte i at en mistet ca 150 m wire, men sonde ble berget.



Figur 5.2. Logging i Bh 1 (venstre). Til høyre trekkes resistivitetssonden løs med traktor etter å ha satt seg fast i rassone på ca 150 m dyp.

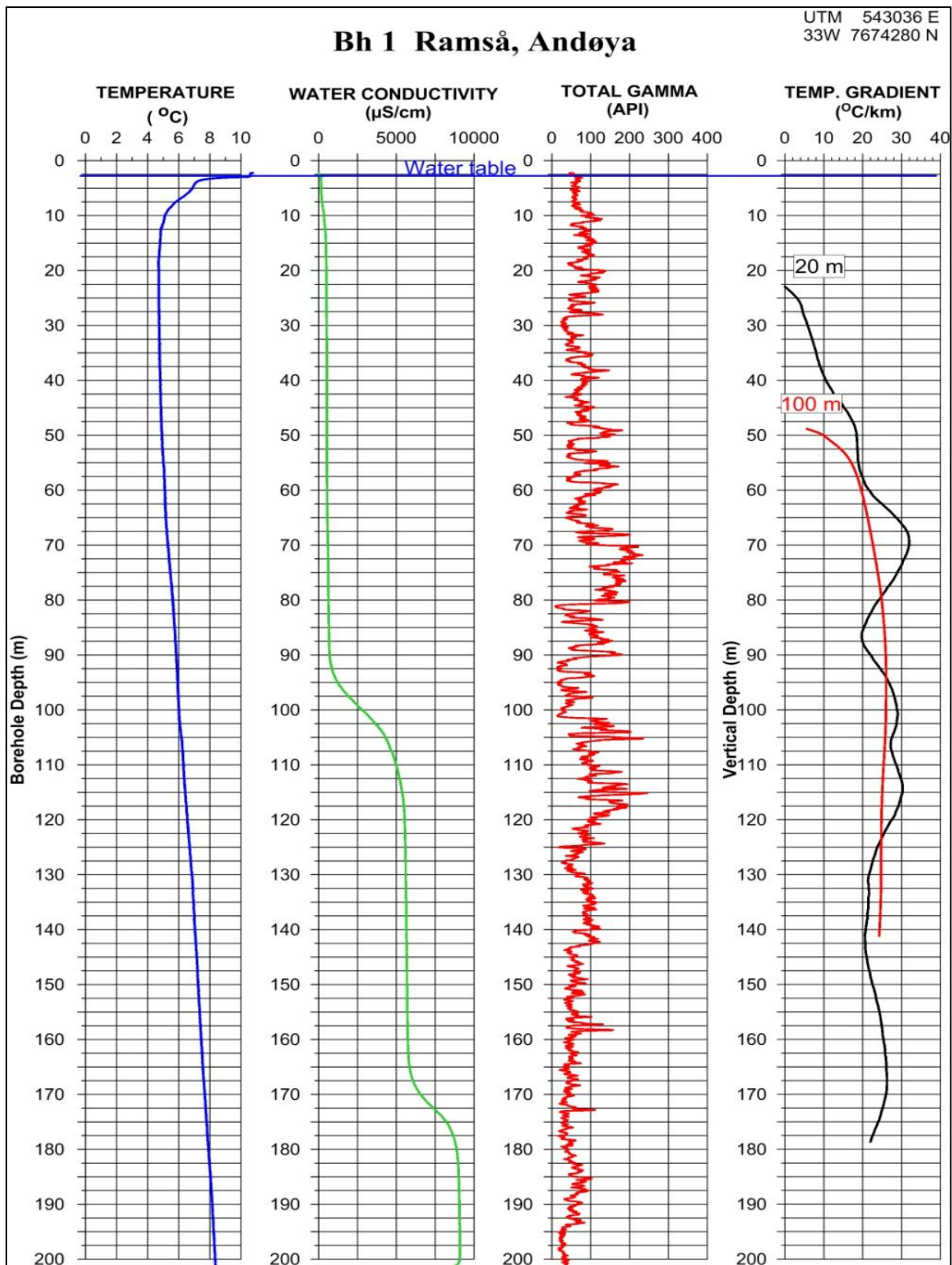
5.1.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh 1

Figur 5.3 viser temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total naturlig gammastråling i Bh1. Fra temperaturdata er temperaturgradienten som viser økning i temperatur pr. km nedover i dypet beregnet. Gradienten er beregnet vertikalt for hver cm med et intervall på 20 og 100 m.

Temperaturen viser i overkant av 8° C i bunnen av hullet. Gradienten er beregnet til 25 °C/km noe som er ganske høyt i Norge. Gjennomsnittlig gradient i Østlandsområdet er i overkant av 20 °C/km.

Den elektriske ledningsevnen i vannet øker mot dypet. Ned til ca 90 m er det ferskt vann med elektrisk ledningsevne ca. 500 µS/cm. Fra ca. 90 m øker ledningsevnen til 5500 µS/cm hvilket betyr økt saltinnhold. Fra ca. 170 m øker ledningsevnen opp mot 9000 µS/cm. Saltinnholdet er betydelig, men det er ikke som for rent sjøvann. Årsaken diskuteres under Bh2 der saltinnholdet nærmer seg sjøvann.

Total naturlig gammastråling varierer mye ned til ca. 120 m dyp, 50 – 200 API. Under 120 er strålingen nesten konstant, 50 API. Dette kan tyde på at en går inn i en annen bergart, grunnfjell? Se også neste kapittel om gammaspktrometri.



Figur 5.3. Bh 1, temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total naturlig gammastråling og beregnet temperaturgradient.

5.1.2 Gammasppektrometri, innhold av U, Th og K, Bh 1.

Figur 5.4 viser total gamma og innhold av U, Th og K målt med gammasppektrometri i Bh1. Målingene er utført som kontinuerlig logg med en hastighet på 1 m/min. Dette gir kort måletid i hvert punkt (for hver cm) og kan gi usikkerhet i beregning av konsentrasjon. NGU har kontrollert slike målinger opp mot punktmålinger der en logger energispekteret i flere minutter for hvert punkt. Det viser seg at det er god korrelasjon mellom punktmålinger og kontinuerlig logg (Elvebakk 2013).

Figur 5.4 viser også hvor grunnfjell ligger under de mesozoiske sedimentene bestemt fra kjernelogging (RABIS-prosjektet) og geofysisk logging. Ut fra det geologiske kartet (figur 3.1 og 5.1) er hullet påsatt i Drageneset-formasjonen før det skjærer inn i Ramså-formasjonen da denne faller mot nord og borehullet mot sør. U- og Th- innholdet er konstant og lavt ned til ca 50 m. Under 50 m er det i hovedsak variasjoner i Th-innhold som styrer total gammastråling. Et område ved 70 - 80 m har forhøyet U- og Th-innhold. Mellom 80 og 113 m er det veldig lavt K-innhold. I metamorft grunnfjell (Andøy granitt), under 114 m dyp, øker K-innholdet. Dette skyldes at granitt inneholder feltspat (kalifeltspat).

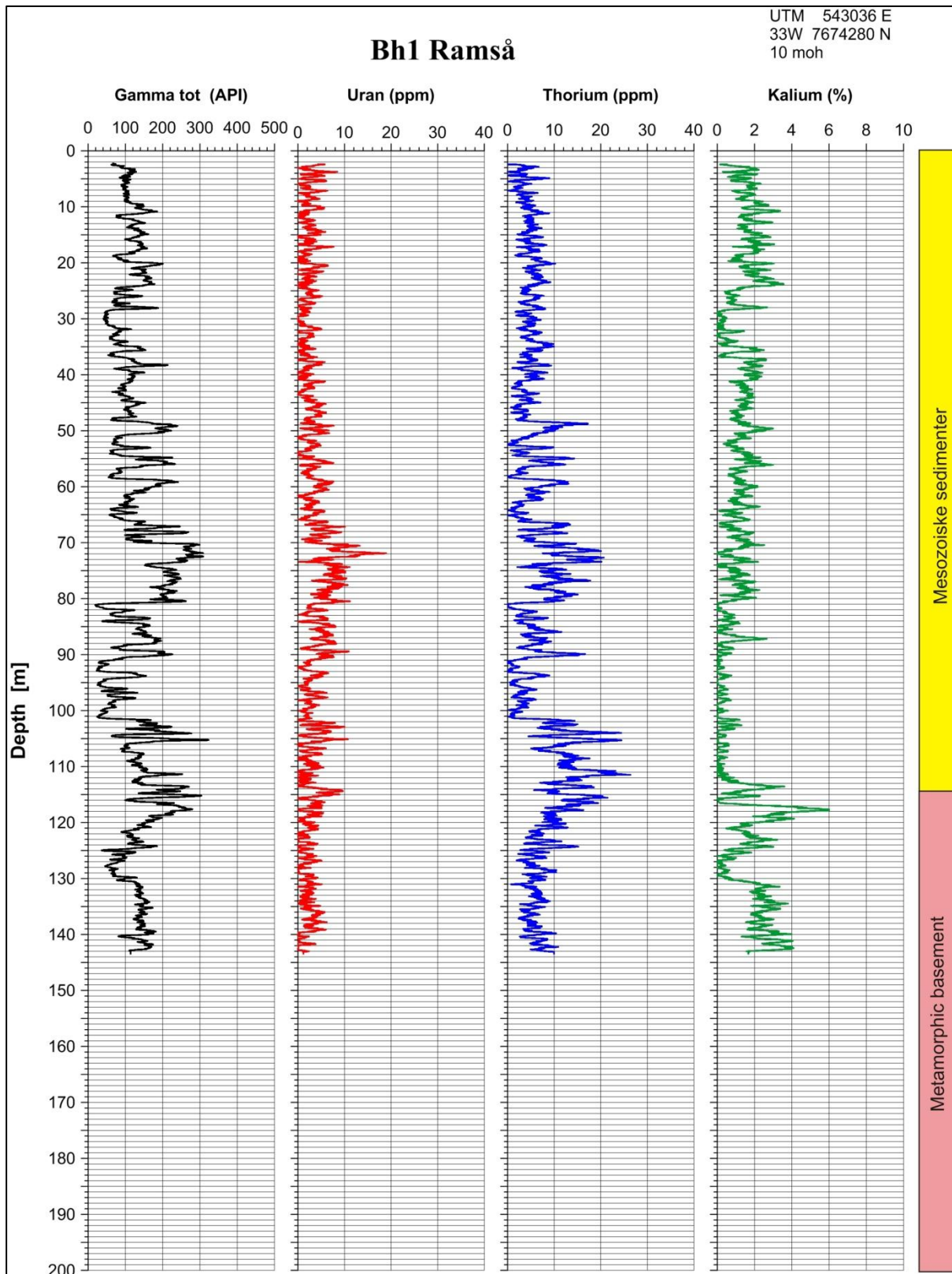
5.1.3 Seismisk hastighet, Resistivitet, Magnetisk susceptibilitet, IP og SP, Bh 1

Figur 5.5 viser logger for seismisk hastighet (P-bølge), total naturlig gammastråling, resistivitet, magnetisk susceptibilitet, induisert polarisasjon (IP), og selvpotensial (SP). Gammastråling er omtalt i kapittel 5.1.1 og 5.1.2. Som nevnt foran var det bare sonden som måler temperatur, ledningsevne og gamma som gikk helt til bunnen av hullet.

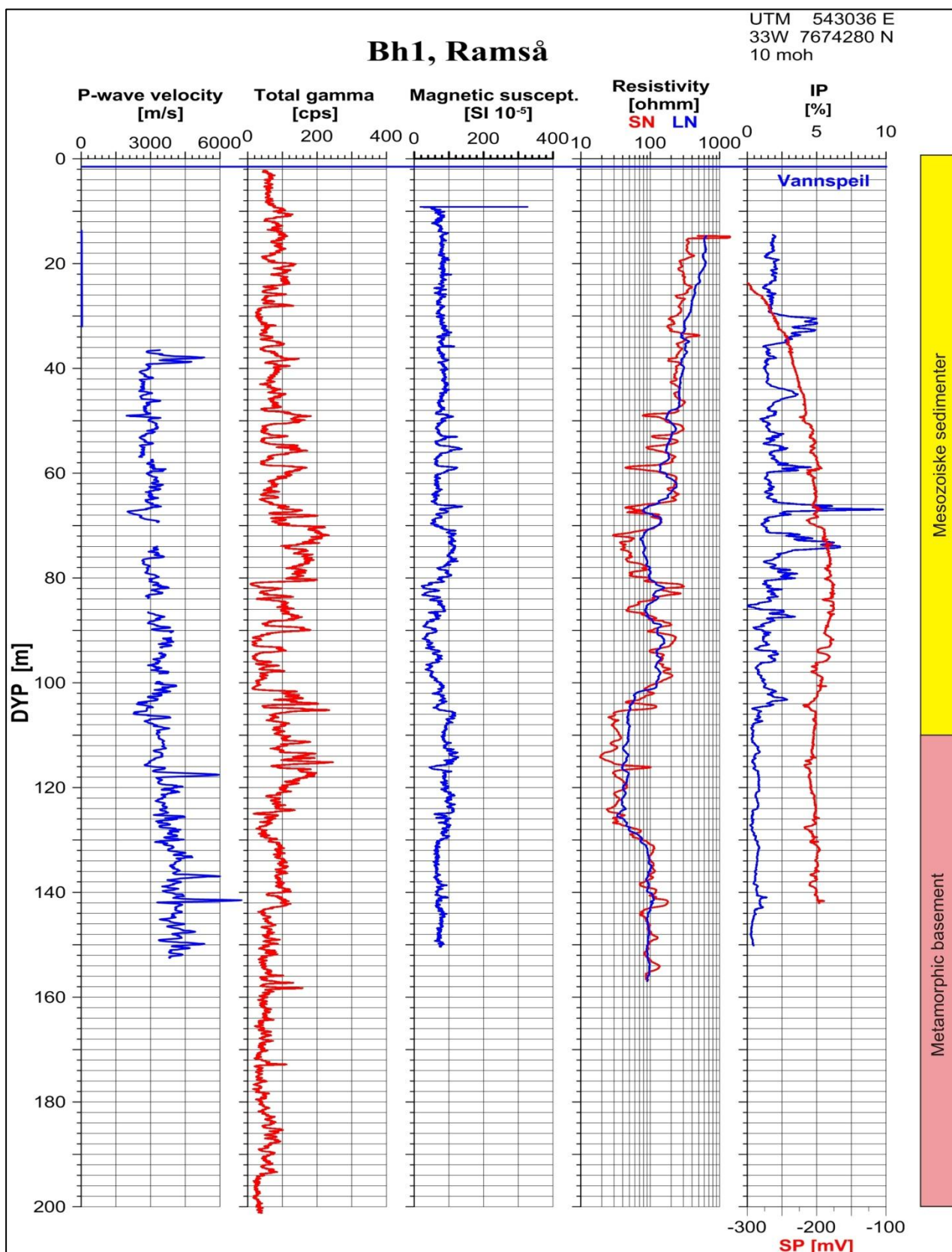
Loggen for seismisk hastighet er noe unøyaktig med hensyn til dyp. Tellehjulet på vinsjen stoppet av og til (mens vinsjen gikk) uten at det ble oppdaget. Registrering forgår bare når tellehjulet går. Da sonden også har gammasensor har en kunnet korrelere til riktig dyp, men en mangler noe data. I den øverste del av hullet er gjennomsnittlig P-bølgehastighet 2900 m/s. Hastigheten øker gradvis mot 3300 m/s i de sedimentære bergartene og i grunnfjell opp mot 4000 m/s. Dette er lavere verdier enn i kjente sandsteiner og granitter andre steder i fastlands Norge. Sandsteinene på Andøya er yngre og ikke så konsoliderte som sandsteiner i Oslofeltet og vil dermed ha noe lavere hastighet. Uoppsprukket granitt har en P-bølgehastighet på 5000 – 5500 m/s (Elvebakk 2011). Dette kan tyde på at grunnfjellet her er noe oppsprukket. Det er foreløpig uklart om det er forvitring i grunnfjell da en ikke har alle analyser klare i RABIS-prosjektet. Det henvises til endelig publikasjon som er planlagt i løpet av 2017.

Resistiviteten er generelt svært lav. Dette skyldes ikke bare primær porøsitet og oppsprekking, men også salt porevann. Saltinnholdet (og dermed elektrisk ledningsevne) øker mot dypet, se figur 5.3 foran. Variasjoner kan skyldes oppsprekking.

Magnetisk susceptibilitet er lav, 70 – 100 SI 10^{-5} , og varierer lite. Det kan ikke påvises noen reduksjon som kan skyldes forvitring. Forhøyet IP skyldes vanligvis sulfider, men også leire kan gi IP-effekt. Det er påvist leire i forvitret gneis på overflaten i det sørlige Ramsåbassenget (Olesen et al. 2012). Høyest IP i Bh1 er imidlertid påvist i de sedimentære bergartene, figur 5.5, og ingen økning knyttet til leiomvandling i forvitret grunnfjell.



Figur 5.4. Bh 1, Total gamma, U, Th og K-innhold målt ved gammaspektrometri.



Figur 5.5. Bh 1. Seismisk hastighet, magnetisk susceptibilitet, resistivitet, IP og SP.

5.1.4 Akustisk televierer, sprekkkartlegging og beregning av foliasjon, Bh 1

Bh1 ble logget med akustisk televierer til 141 m dyp. Alle observerte sprekker er digitalisert med beregning av fallretning og fallvinkel. Det er laget sprekkfrekvenshistogram, og rosedigram.

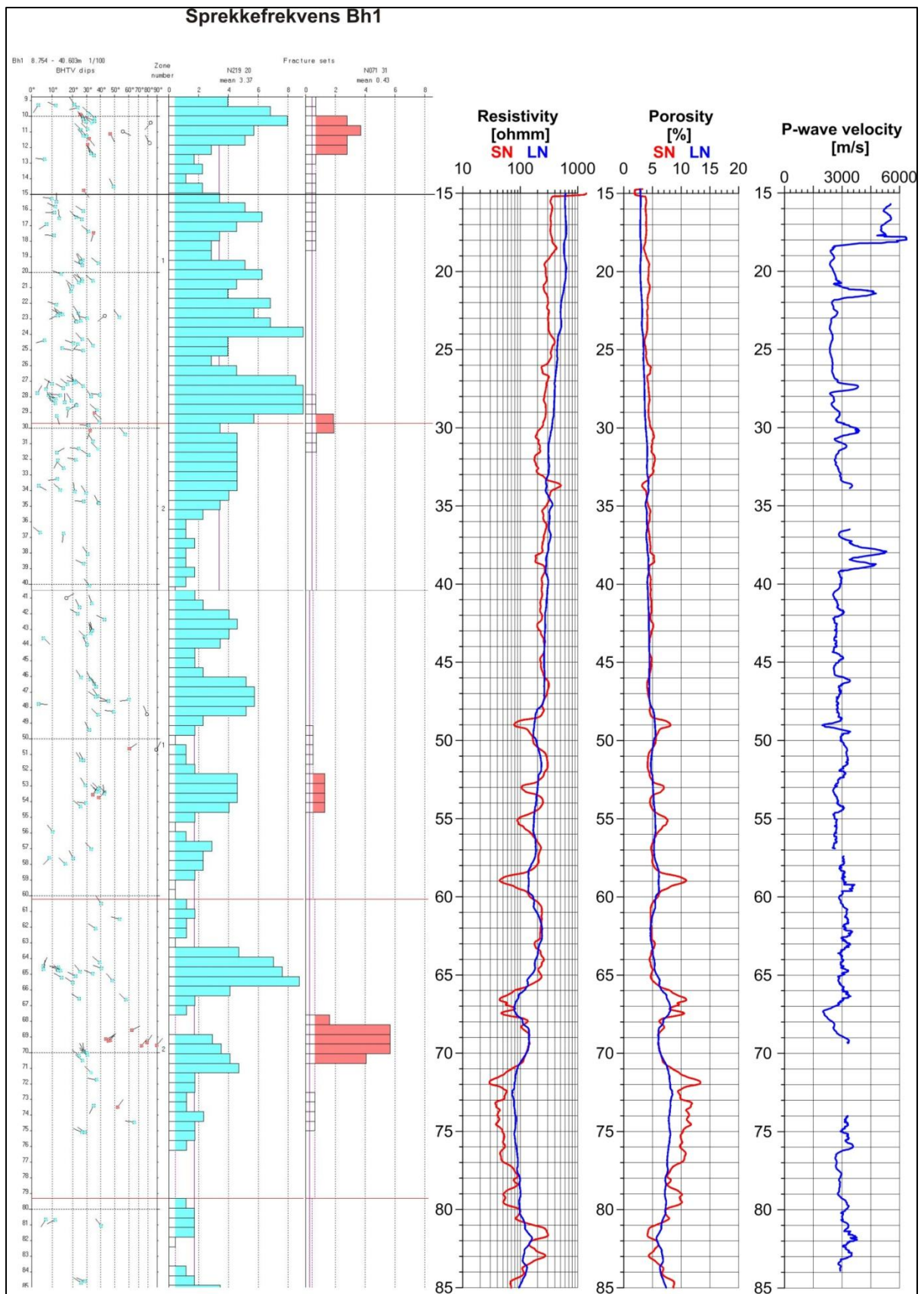
Figur 5.6 og 5.7 viser individuelle sprekker, histogram over sprekkfrekvens, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P-bølge hastighet for Bh1. Hullet er sterkt oppsprukket ned til ca 70 m og spesielt de øverste 35 m med sprekkfrekvenser opp mot 8-9 sprekker /m. Dette er i de sedimentære bergartene. Videre er hullet kraftig oppsprukket fra ca 105 m og ned til 140 m der grunnfjell starter ved ca 115 m. Om det er dypforvitring kan disse målingene ikke si noe om. Her henvises til RABIS-prosjektet.

Figur 5.8 viser rosedigrammer med plott av sprekkens fallretning (asimut) og fallvinkel. Gjennomsnittlig fallretning er mot nordvest og gjennomsnittlig fallvinkel er ca 30°.

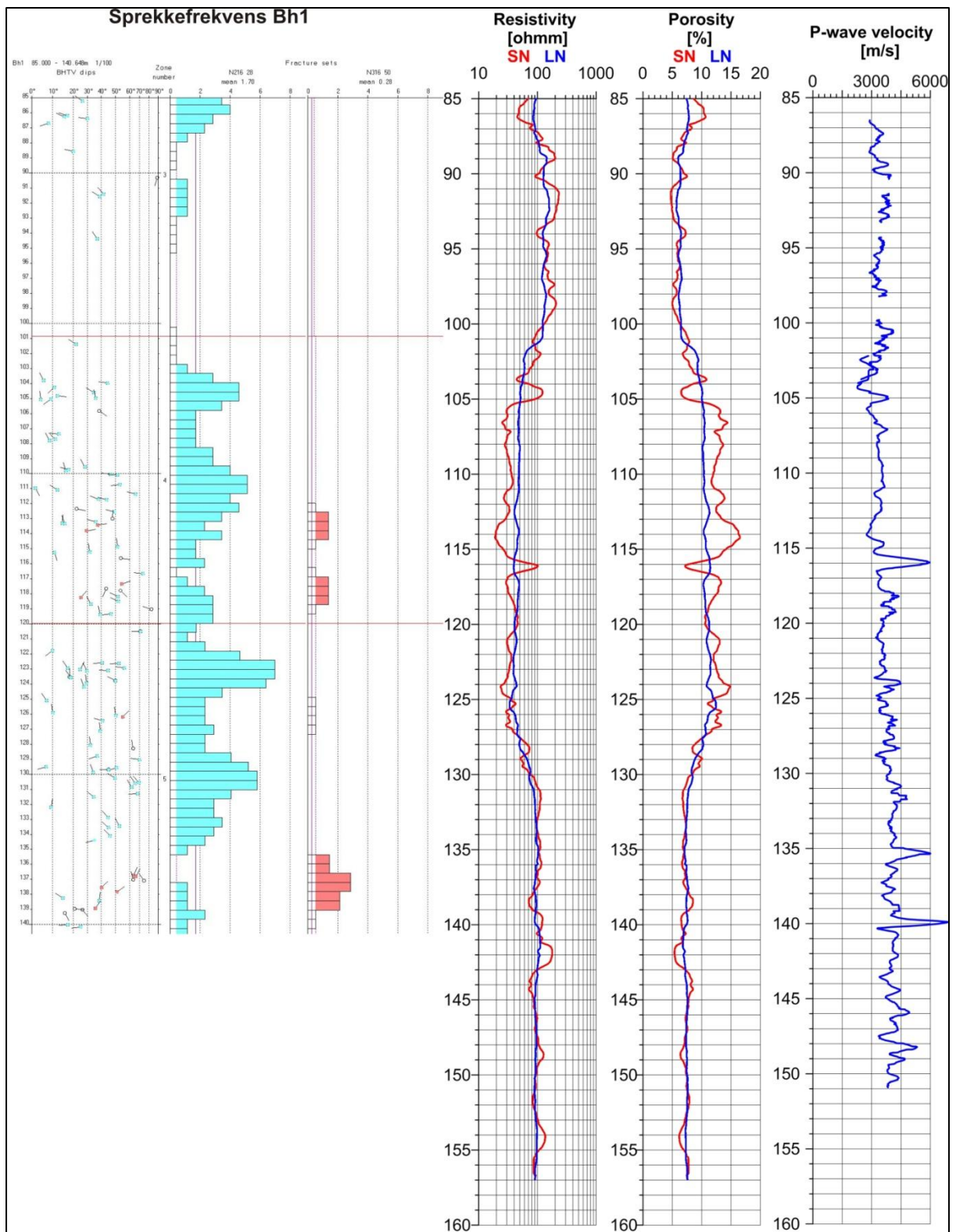
I mesteparten av hullet kan en på det akustiske bildet se tydelig foliasjon i de sedimentære bergartene. Det er noe vanskeligere i grunnfjell (gneis). En benytter samme data som ved sprekkkartlegging og digitaliserer foliasjonen som en sprekk. På samme måten som for sprekker kan en da beregne fallretning og fallvinkel til foliasjonen. Figur 5.9 (venstre) viser foliasjonens fallretning og fallvinkel plottet mot dyp. Til høyre vises borehullsforløp og borehullets fallvinkel. Borehullsretning og foliasjonens fallretning er også vist i rosedigram. Borehullet går mot sør.

Foliasjonen i de sedimentære bergartene faller mot nordvest med et gjennomsnittlig fall på 25 – 30°. Noen steder er fallet mindre enn 10° og opp mot 35°.

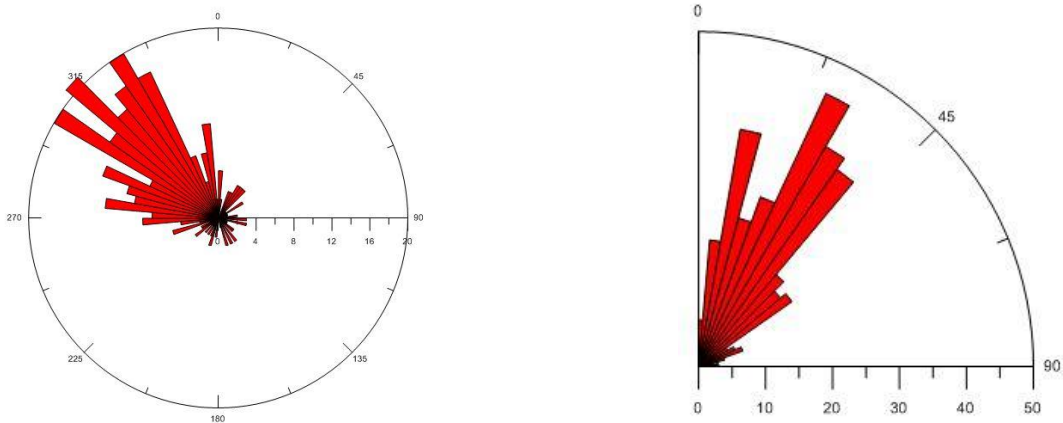
Figur 5.10 viser akustisk bilde fra 68 – 72 m (i mesozoiske sedimenter) og oppsprukket grunnfjell, 127 – 131 m.



Figur 5.6. Bh 1, 9 – 85 m. Individuelle sprekker, sprekkerekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porositet og P- bølgehastighet.



Figur 5.7. Bh 1, 85 – 140 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølgehastighet.



Figur 5.8. Sprekker i Bh 1. Rosediagram fallretning (venstre) og fallvinkel (høyre).

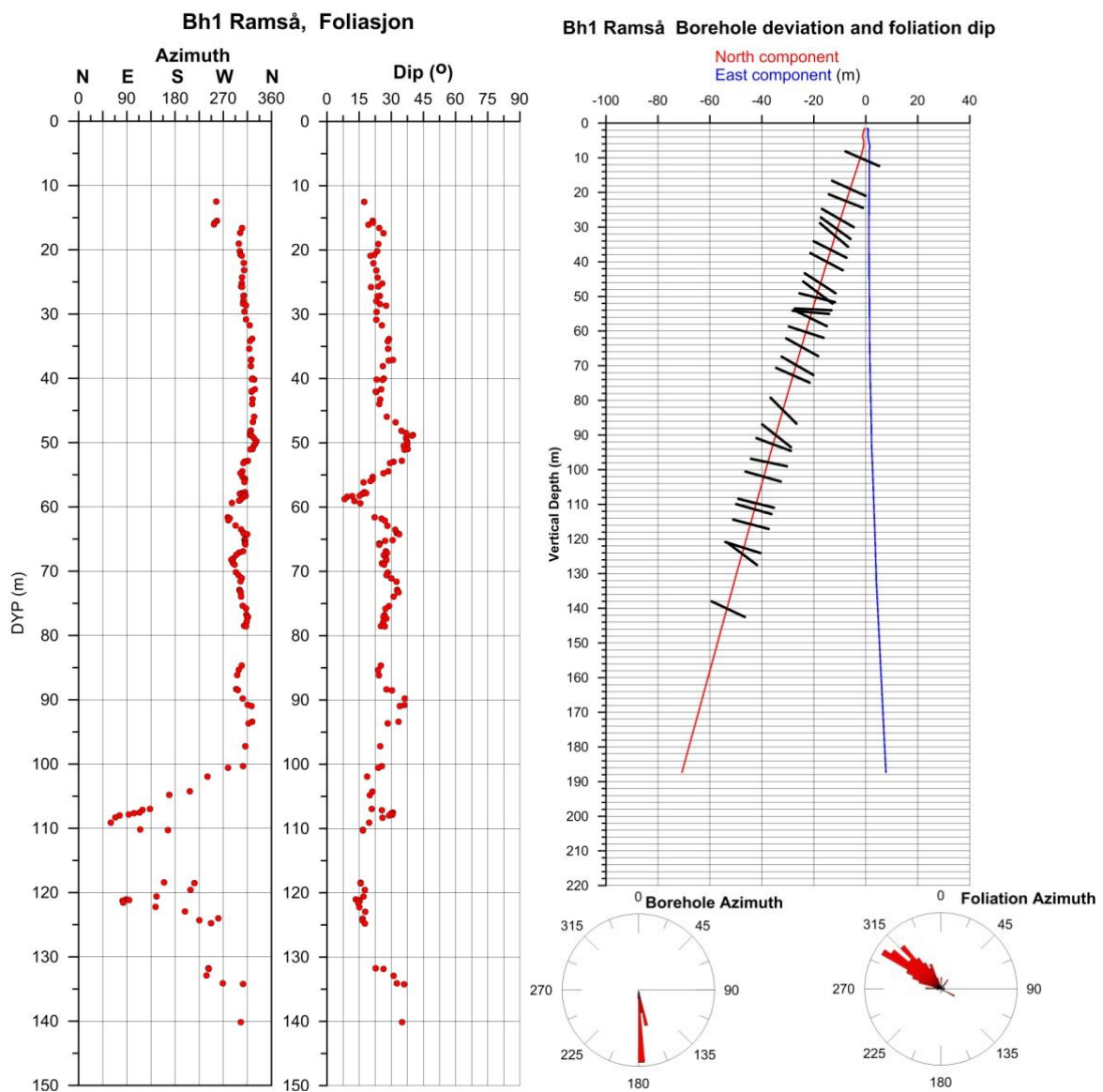
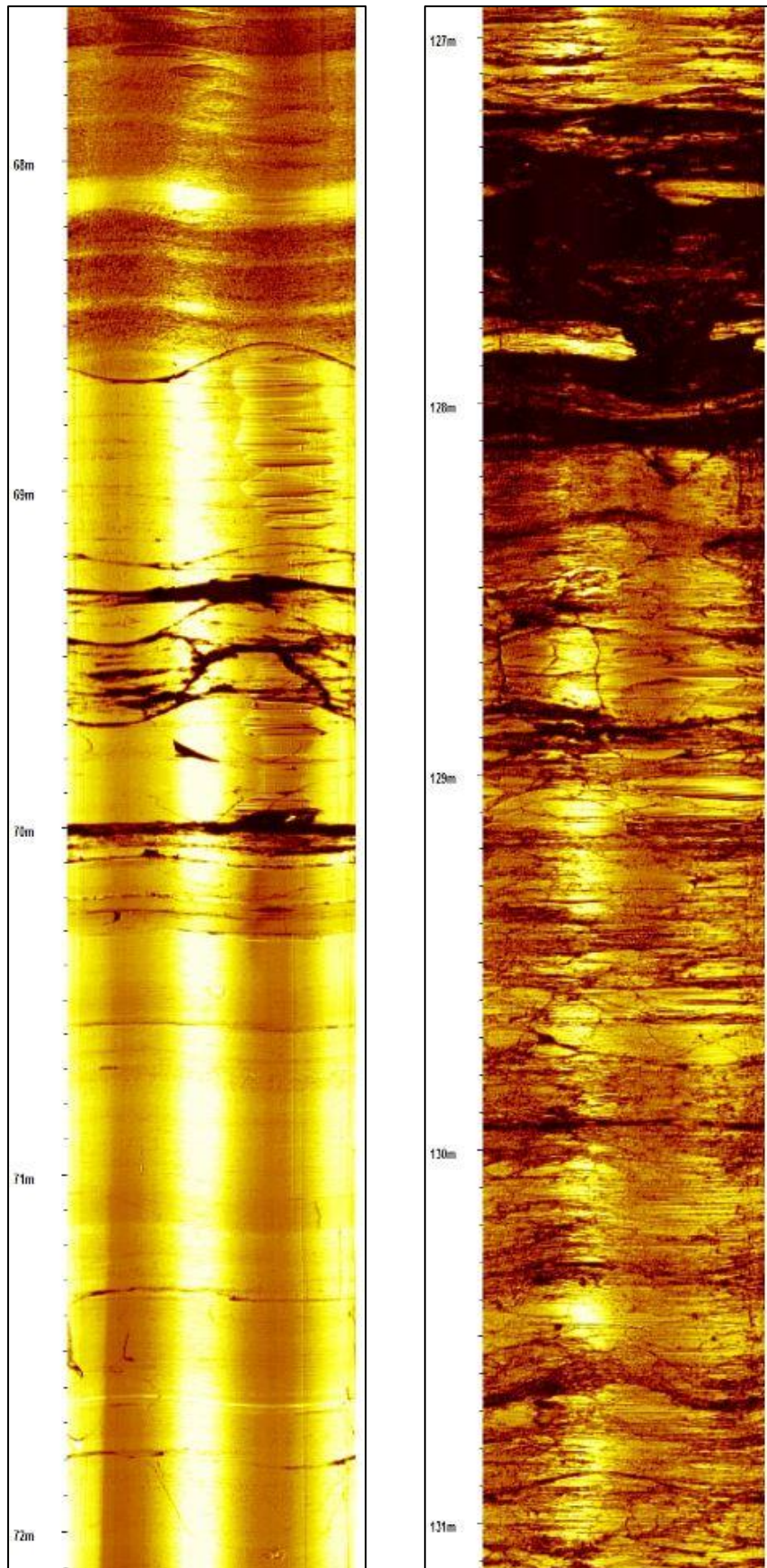


Figure 5.9. Foliasjon i Bh 1. Fallretning og fallvinkel (venstre), borehullsforløp med fallvinkel (høyre).



Figur 5.10. Bh 1. Akustisk bilde fra mesozoiske sediment, 68 – 72 m (venstre), og oppsprukket grunnfjell 127 – 131 m (høyre).

5.2 Resultater Bh2

Bh 2 ble boret ca 1 km fra sjøkanten, ved "Fjellveien", se oversiktskart figur 2.1. Hullet ble boret mot vest-nordvest med 60° fall. Boret dyp var 217 m, dypeste logg var ca. 215m. Figur 5.11 viser lokasjon for Bh 2.



Figur 5.11. Lokasjon Bh 2 langs "Fjellveien".

5.2.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh 2.

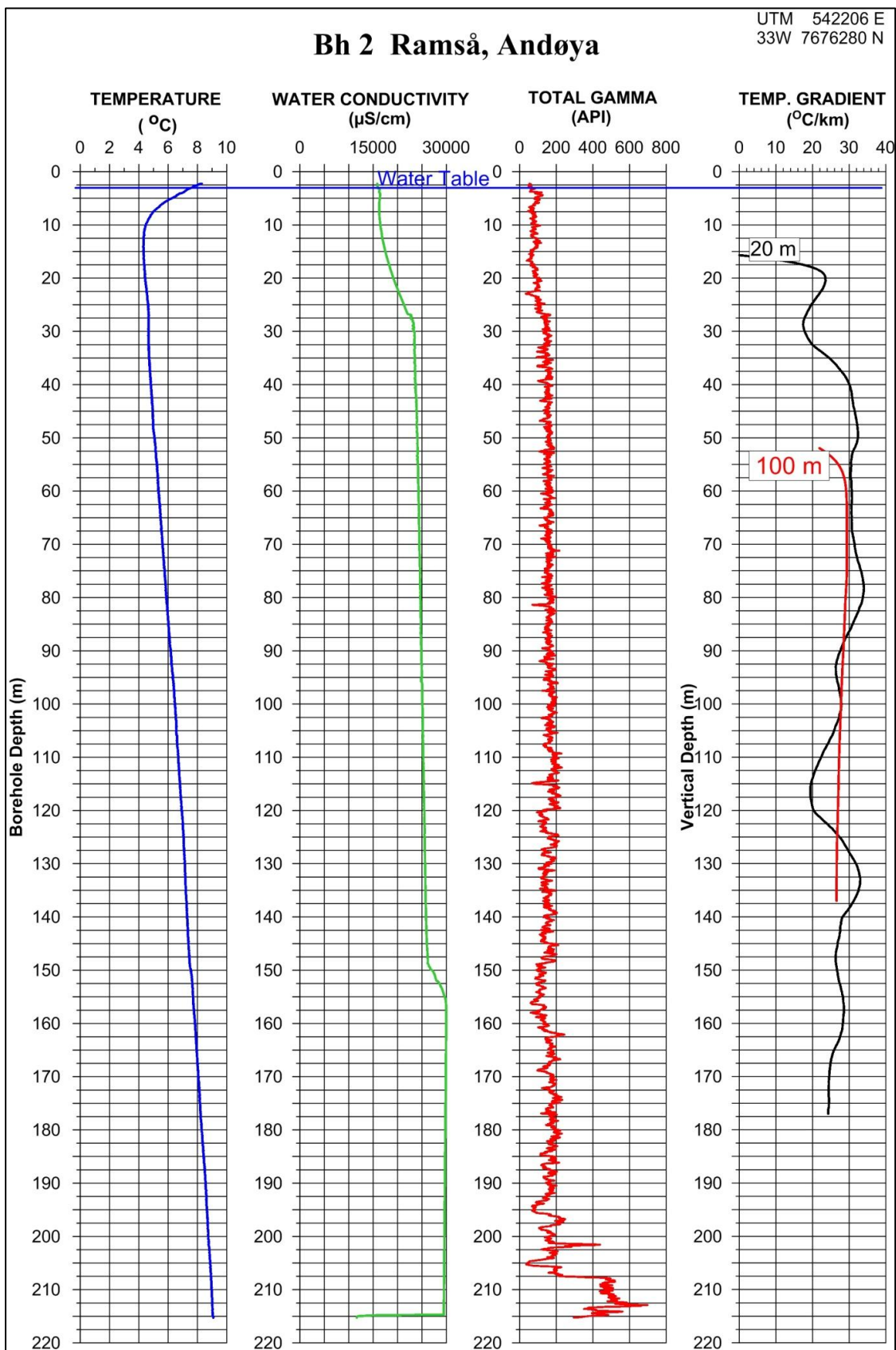
Figur 5.12 viser temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total naturlig gammastråling i Bh 2. Fra temperaturdata er temperaturgradienten beregnet som viser økning i temperatur pr. km nedover i dypet. Gradienten er beregnet vertikalt for hver cm med et intervall på 20 og 100 m.

Temperaturen viser 9.1° C i bunnen av hullet. Gradienten er beregnet til ca 30 °C/km i øvre del av hullet og 25 °C/km i nedre del noe som er ganske høyt i Norge. Variasjonen skyldes etter all sannsynlighet variasjoner i varmeledningsevnen. Gjennomsnittlig gradient i Østlandsområdet er i overkant av 20 °C/km.

Den elektriske ledningsevnen i vannet øker mot dypet. Det er salt vann helt øverst i hullet (2 m) med en ledningsevne på 16000 µS/cm. Den øker gradvis til 25000 µS/cm ved 70 m. Fra 155 m er den 30000 µS/cm (resistivitet 0,33 Ωm). Dette er nesten ledningsevnen til rent sjøvann som har en ledningsevne på ca 45000 µS/cm ved normale sjøtemperaturer. Observert vann på overflaten var ikke salt (smaksprøve).

Årsaken til det salte vannet er diskutert og mest sannsynlig er det fossilt vann som er "fanget" i de sedimentære bergartene. I følge A. Dalland (1975) danner de mesozoiske sedimentene en trauforn. Saltvann er tyngre enn ferskvann og saltvann i sedimentbassenget under dannelsen kan ha blitt værende i bunnen av dette trauret.

Total naturlig gammastråling er noenlunde konstant, ca 200 API, helt ned til 208 m der den øker tydelig trolig ved overgang til grunnfjell. Svekingen de øverste 25 m skyldes casing og boring i løsmasser.

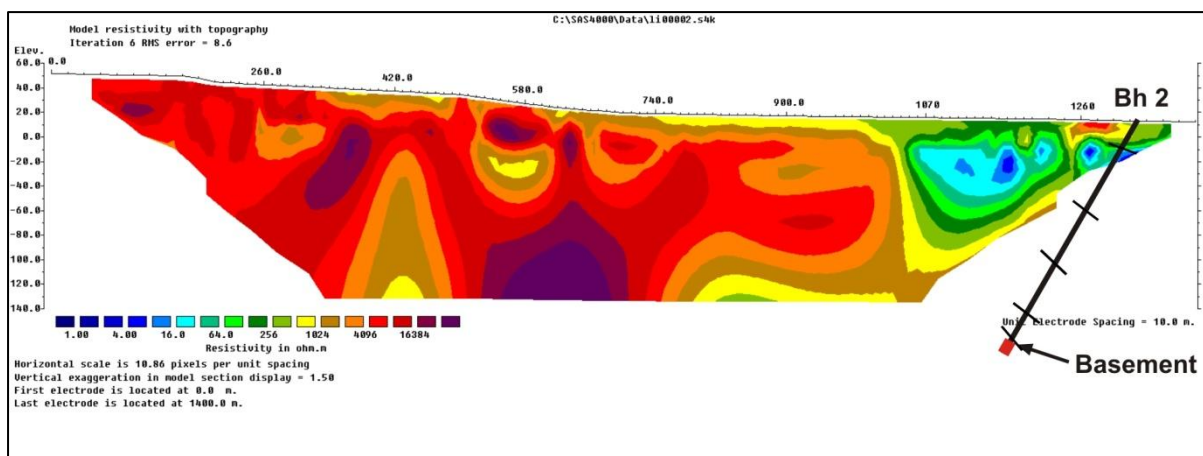


Figur 5.12. Bh 2, temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total naturlig gammastråling og beregnet temperaturgradient.

5.2.2 Gammaspectrometri, innhold av U, Th og K, Bh 2.

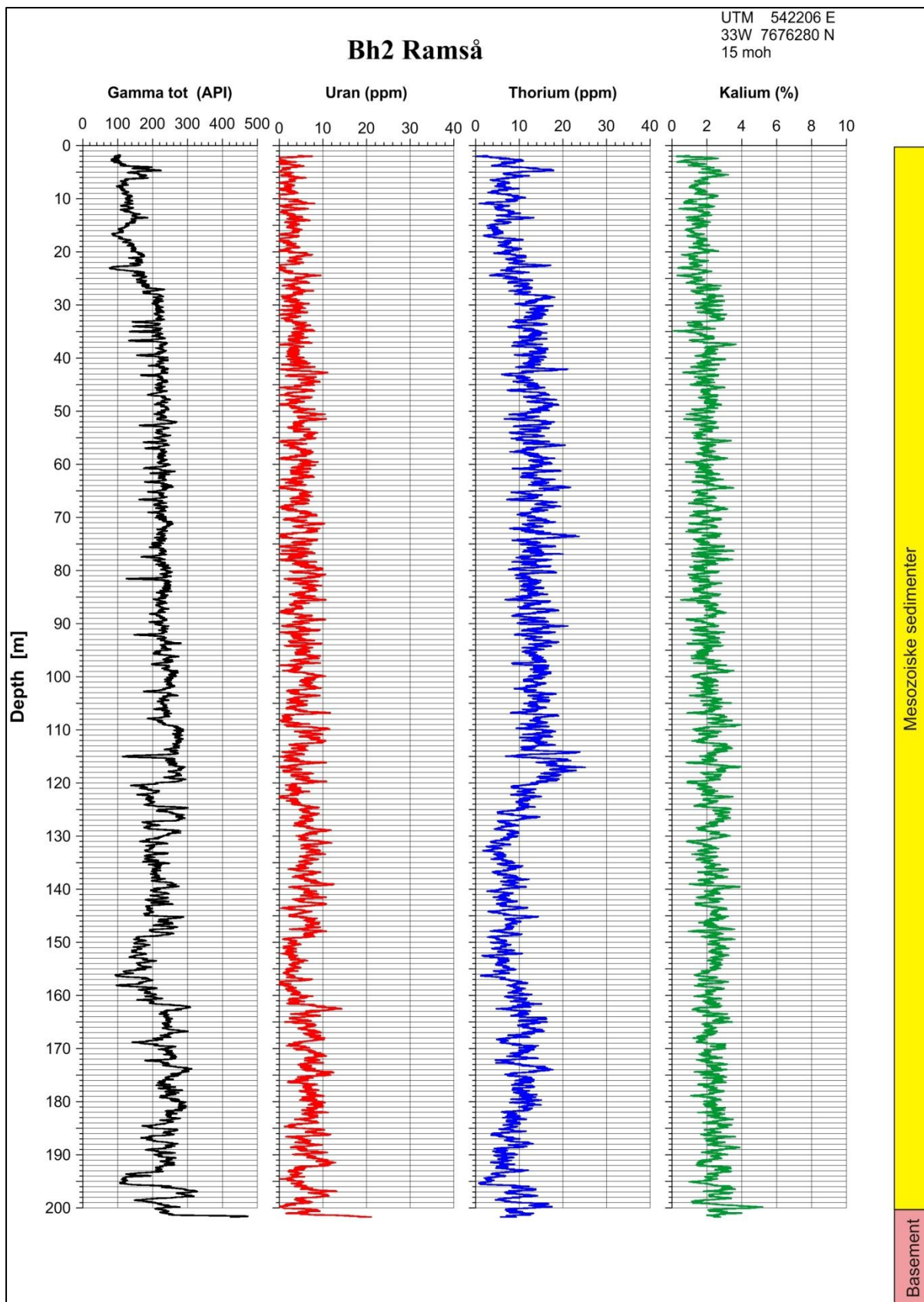
Figur 5.13 viser 2D resistivitet langs veien forbi Bh 2 og grensen mellom de sedimentære bergartene (blå, grønn) og grunnfjell (rød, brun) vises tydelig (fra Olesen et al 2012). Ut fra 2D profilet kunne borehullet vært boret litt lenger vest. I følge det geologiske kartet (Dalland 1975) er Bh 2 satt på lengst vest i Skarsteinsformasjonen, på grensen mot grunnfjellsgneisen. I følge 2D-profilet går grensen ca 250 m lenger vest enn det som er angitt på det geologiske kartet. En forlengelse av resistivetsprofilen mot øst kunne gi ytterlige informasjon om hvordan sedimentære bergarter og overgangen til grunnfjellet vises i slike data.

Figur 5.14 viser total gamma og innhold av U, Th og K målt med gammaspectrometri i Bh 2. Figur 5.14 viser også hvor grunnfjell ligger under de mesozoiske sedimentene bestemt fra kjernelogging (RABIS-prosjektet) og geofysisk logging. Sonden stoppet ved ca 202 m dyp, og en fikk dermed ikke logget mer enn 2 m i grunnfjell som starter ved 200 m.



Figur 5.13. 2D resistivitet som viser grensen mellom de sedimentære bergartene (Skarsteinformasjonen blå, grønn), og grunnfjell (rød, brun). Inntegnet borehull, Bh 2, viser indikert fallvinkel på sedimentene (fra Olesen et al. 2012)

Ned til ca 115 m er det små variasjoner i total gamma og U, Th, K. Under dette dyp går Th-innholdet tydelig ned fra gjennomsnittlig 13.5 ppm til 9.0 ppm. Det er usikkert hva dette skyldes, men en ser også at andre parametre endres fra ca 115 m dyp.



Figur 5.14. Bh 2, Total gamma, U, Th og K-innhold målt med gammaspektrometri.

5.2.3 Seismisk hastighet, resistivitet, magnetisk susceptibilitet, IP og SP, Bh 2

Figur 5.15 viser logger for seismisk hastighet (P-bølge), total naturlig gamma, resistivitet, magnetisk susceptibilitet, induert polarisasjon (IP), og selvpotensial (SP) i Bh2. Gammastråling er omtalt i kapittel 5.2.1 og 5.2.2. Data for P-bølg hastighet i grunnfjell er målt bare i ca. 2 m av hullet da sonden stoppet noen meter før bunnen var nådd. Litologisk logging av kjerner viste grunnfjell fra ca. 200 m (RABIS-prosjekt).

Seismisk P-bølg hastighet er noenlunde konstant i hele hullet, 3100 – 3400 m/s.

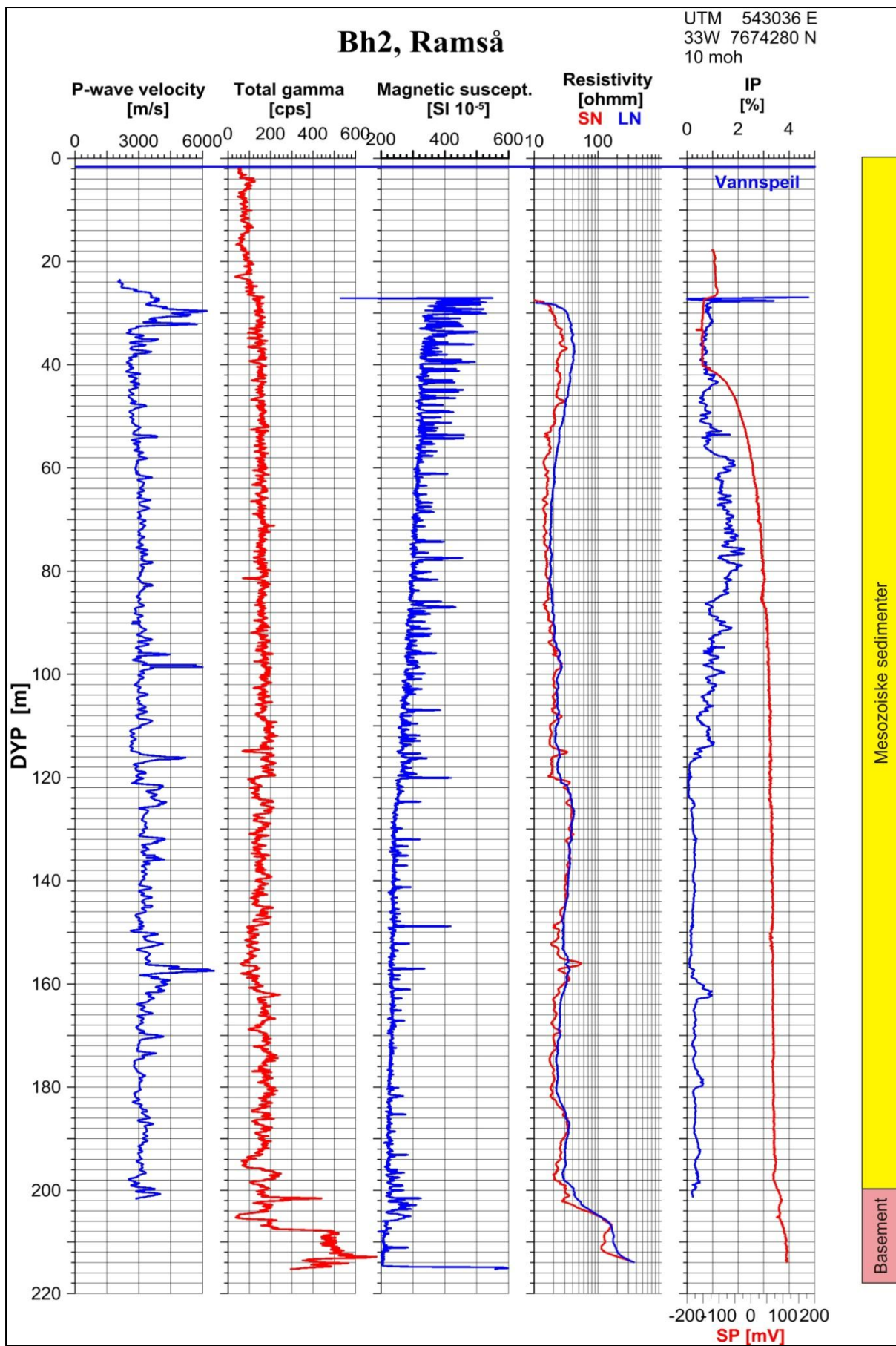
Oppsprukket sandstein andre steder i Norge har en hastighet på 4000-5000 m/s (Elvebakk 2011). Dette kan tyde på at sandsteinene på Ramså generelt har en lavere hastighet og høyere porøsitet enn eldre sandsteiner i Norge. Det kan også tyde på sterkt oppsprukket bergart.

Akustisk televiwer-logg viser at hele Bh 2 er sterkt oppsprukket, se senere.

Resistiviteten er generelt svært lav, $< 100 \Omega\text{m}$. Dette skyldes ikke bare primær porøsitet og oppsprekking, men også salt porevann. Saltinnholdet (og dermed elektrisk ledningsevnen i porevannet) øker mot dypet, se figur 5.12 foran. Det er en svak økning i resistiviteten fra 115 m. Mot bunnen av hullet øker resistiviteten betydelig, $200 \Omega\text{m}$, og en antar at dette skyldes overgang til grunnfjellsbergarter. Akustisk televiwer nådde ikke helt til bunns i hullet så det mangler data fra denne i grunnfjellet. Mineralogiske og kjemiske undersøkelser har vist at det ikke er forvitret grunnfjell i dette hullet (RABIS-prosjekt). Tilsynelatende porøsitet er ved Archie's lov beregnet til ca 15 %. Det er kanskje ikke så urimelig i en sterkt oppsprukket mesozoisk sandstein, men denne verdien er usikker på grunn av liten kunnskap om konstanter Archie's lov (se avsnitt 4.1).

Magnetisk susceptibilitet avtar gradvis nedover hullet fra $400 - 500 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$ til ca. $250 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$. Som for de andre målte parametre er det et skille ved 115 -120 m med tydelig lavere susceptibilitet under dette dyp. Loggingen av magnetisk susceptibilitet går ikke langt nok ned i grunnfjellet til å kunne avdekke variasjoner som skyldes forvitring.

Indusert polarisasjon viser tydelig høyere verdier over 115 m enn under. Over 115 m har en IP på 1 – 2 %. Verdiene er lave i forhold til det en finner ved sulfidmineraliseringer, men leire kan også gi svak IP effekt. Årsaken til forhøyet IP-nivå kan bare finnes ved mineralogiske undersøkelser.



Figur 5.15. Bh 2. Seismisk hastighet, resistivitet, magnetisk susceptibilitet, IP og SP.

5.2.4 Akustisk televiewer, sprekkekartlegging og beregning av foliasjon, Bh 2

Bh 2 ble logget med akustisk televiewer til 207 m dyp og en fikk logget ca. 7 m i grunnfjell som ligger på dyp 200 m. Alle observerte sprekker er digitalisert med beregning av fallretning og fallvinkel. Det er laget sprekkefrekvenshistogram og rosedigram.

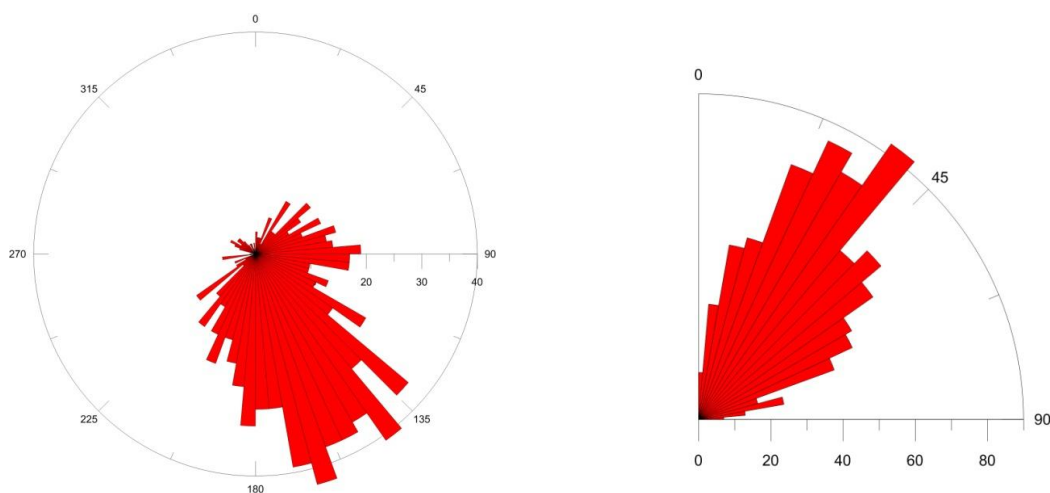
Figur 5.16 viser rosedigrammer av indikerte sprekker med plott av fallretning (asimut) og fallvinkel. Gjennomsnittlig fallretning er mot sør-sørøst og gjennomsnittlig fallvinkel er ca 30°.

Figur 5.17, 5.18 og 5.19 viser individuelle sprekker, sprekkefrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P-bølge hastighet for Bh2. Hele hullet er sterkt oppsprukket med sprekkefrekvenser opp mot 8-12 sprekker /m. Dette er i de sedimentære bergartene.

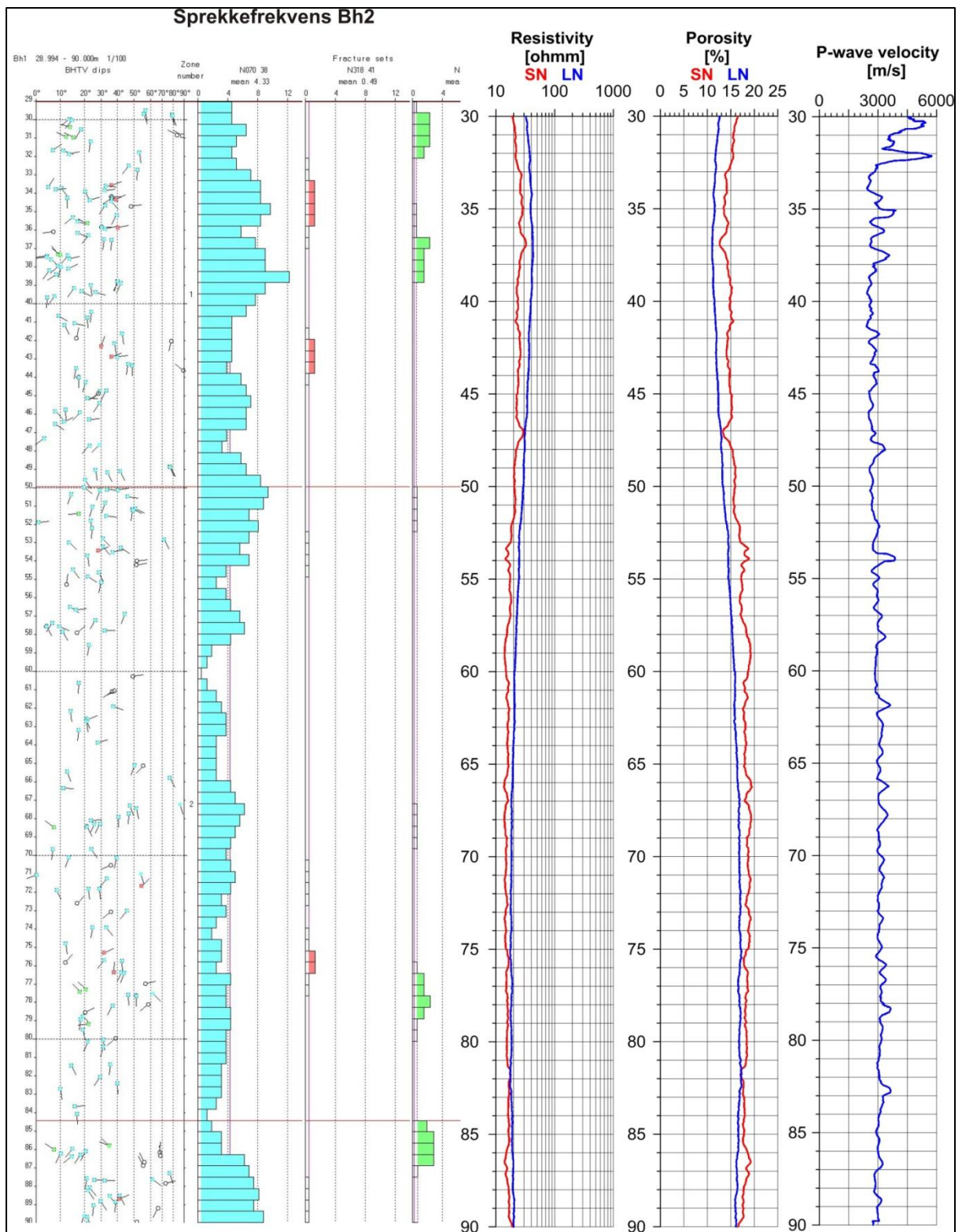
I mesteparten av hullet kan en på det akustiske bildet se tydelig foliasjon i de mesozoiske sedimentene. En benytter samme grunnlagsdata som ved sprekkekartlegging og digitaliserer foliasjonen som en sprekke. På samme måten som for sprekker kan en da beregne fallretning og fallvinkel. Figur 5.20 (venstre) viser beregnet fallretning og fallvinkel plottet mot dyp. Til høyre vises borehullsforløp og plottet fallvinkel. Borehullsretning og foliasjonens fallretning er også vist i rosedigram. Borehullet går mot vest-nordvest.

De sedimentære bergartene faller mot sør med et gjennomsnittlig fall på 15 – 20 ° i de øverste 90 m av hullet. Nedre del har en fallvinkel på 35 – 50 ° og fallretning er mot sør-sørøst. Dette bekrefter tidligere omtalte trauform (Dalland 1975). I Bh 1 faller de mesozoiske sedimentene mot nordvest, og i Bh 2 mot sør-sørøst.

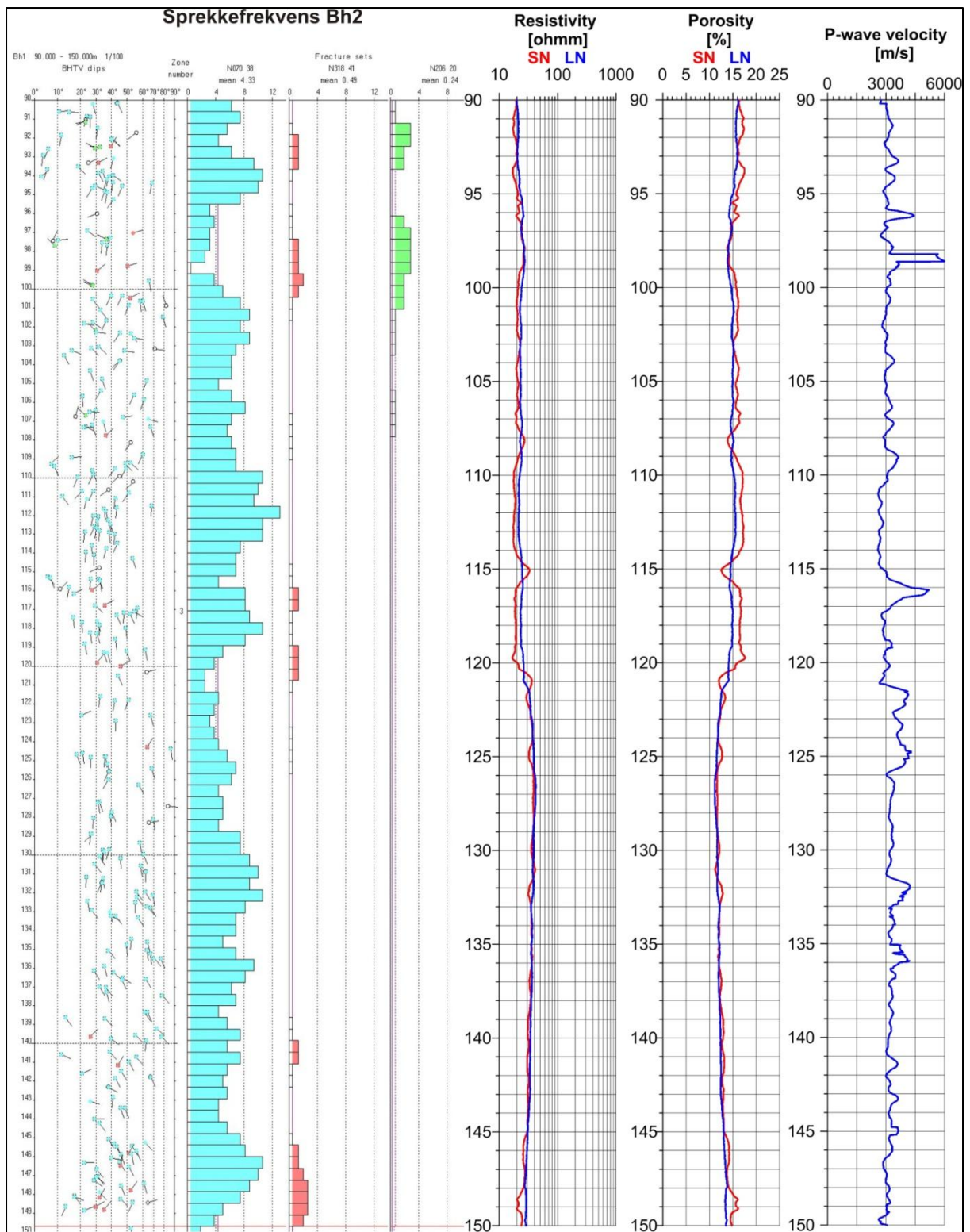
Figur 5.21 viser akustisk bilde av Bh 2, 112-115 m, i oppsprukket sediment og 201-204 m i tydelig oppsprukket grunnfjell. De vertikale stripene skyldes at sonden ikke er helt sentrert, noe som er vanskelig å unngå i hull som ikke er vertikale. De har ingen betydning for tolkningen.



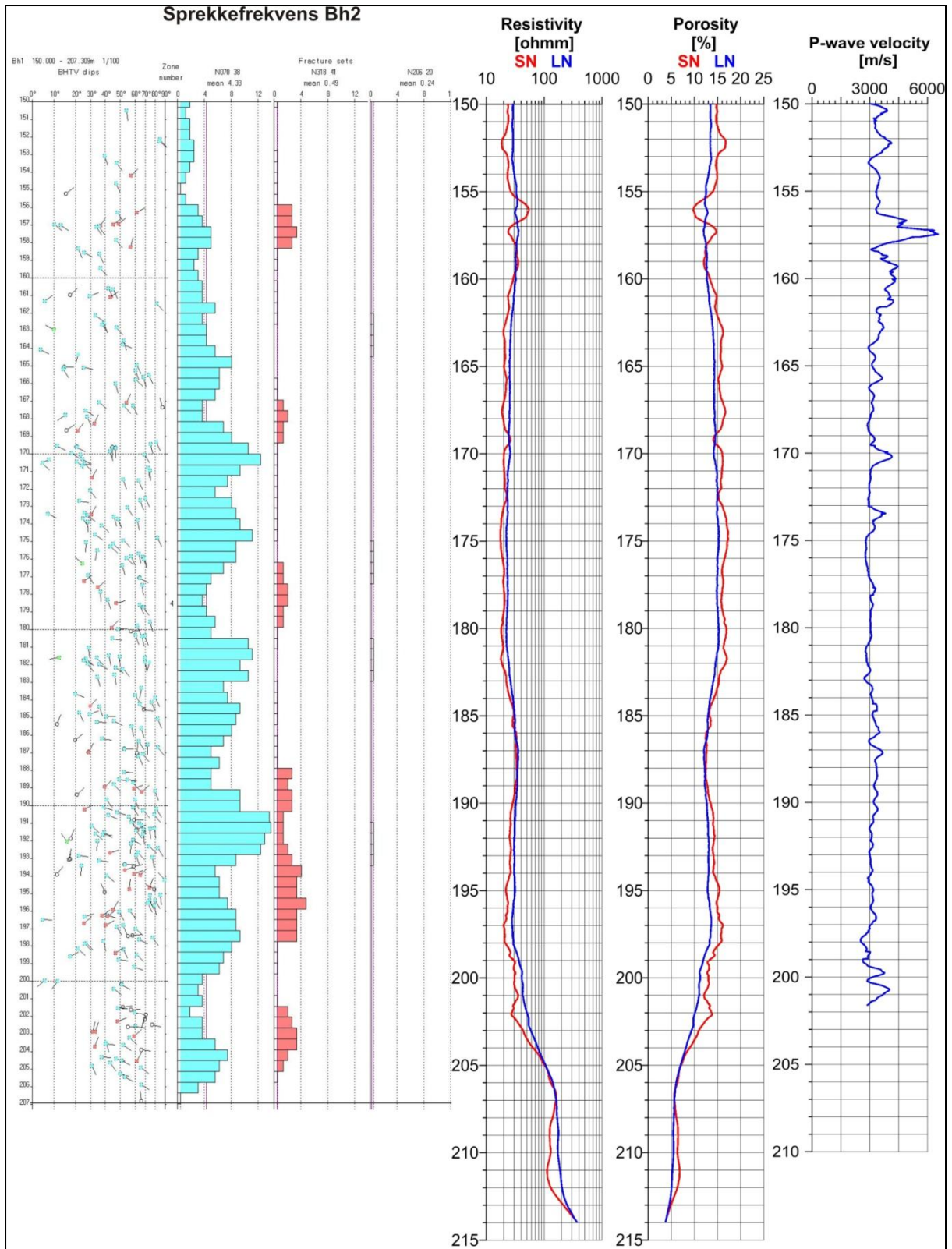
Figur 5.16. Rosedigram over indikerte sprekker i Bh 2 (venstre) og fallvinkel (høyre).



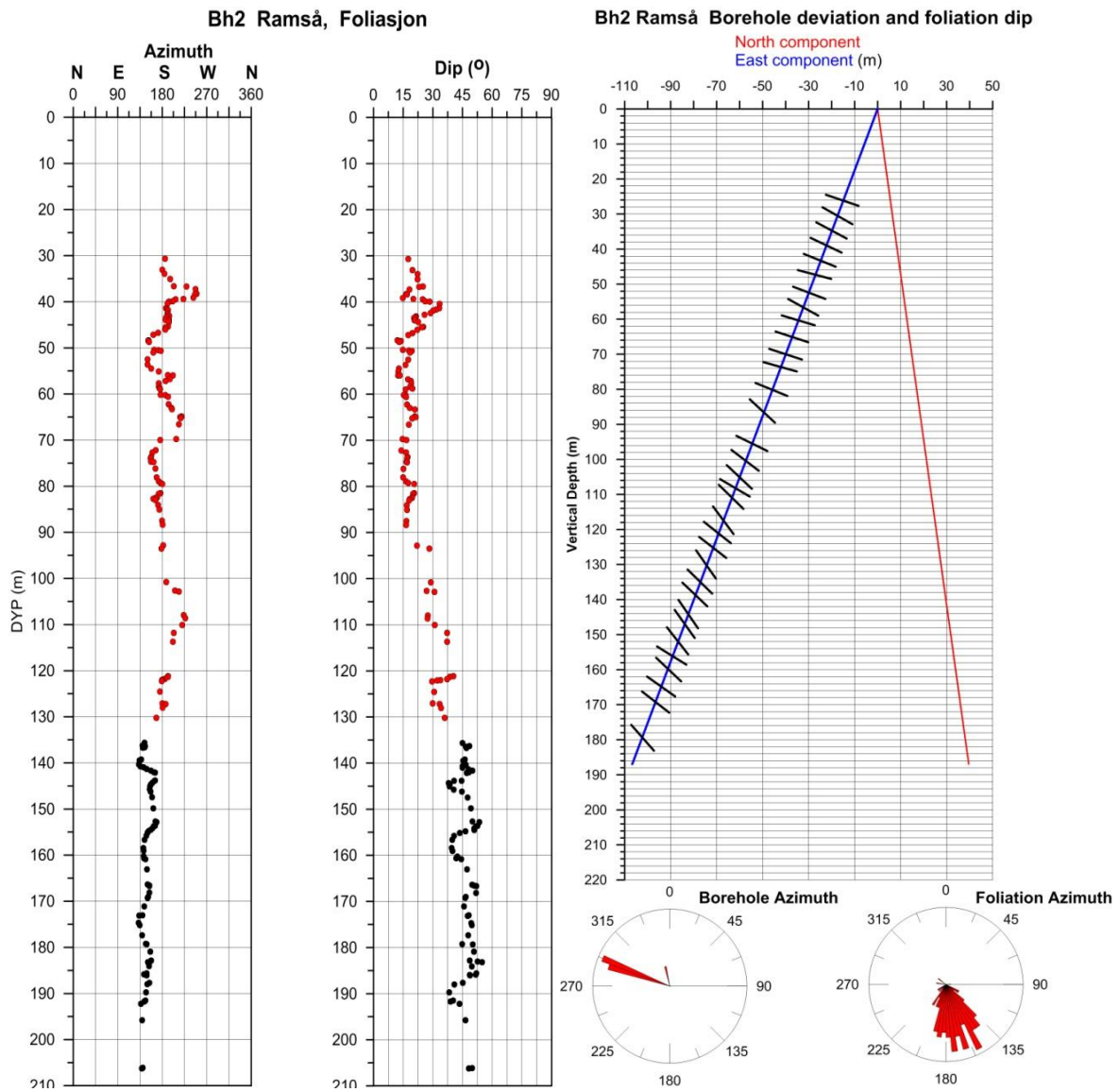
Figur 5.17. Bh 2, 30 – 90 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølgehastighet.



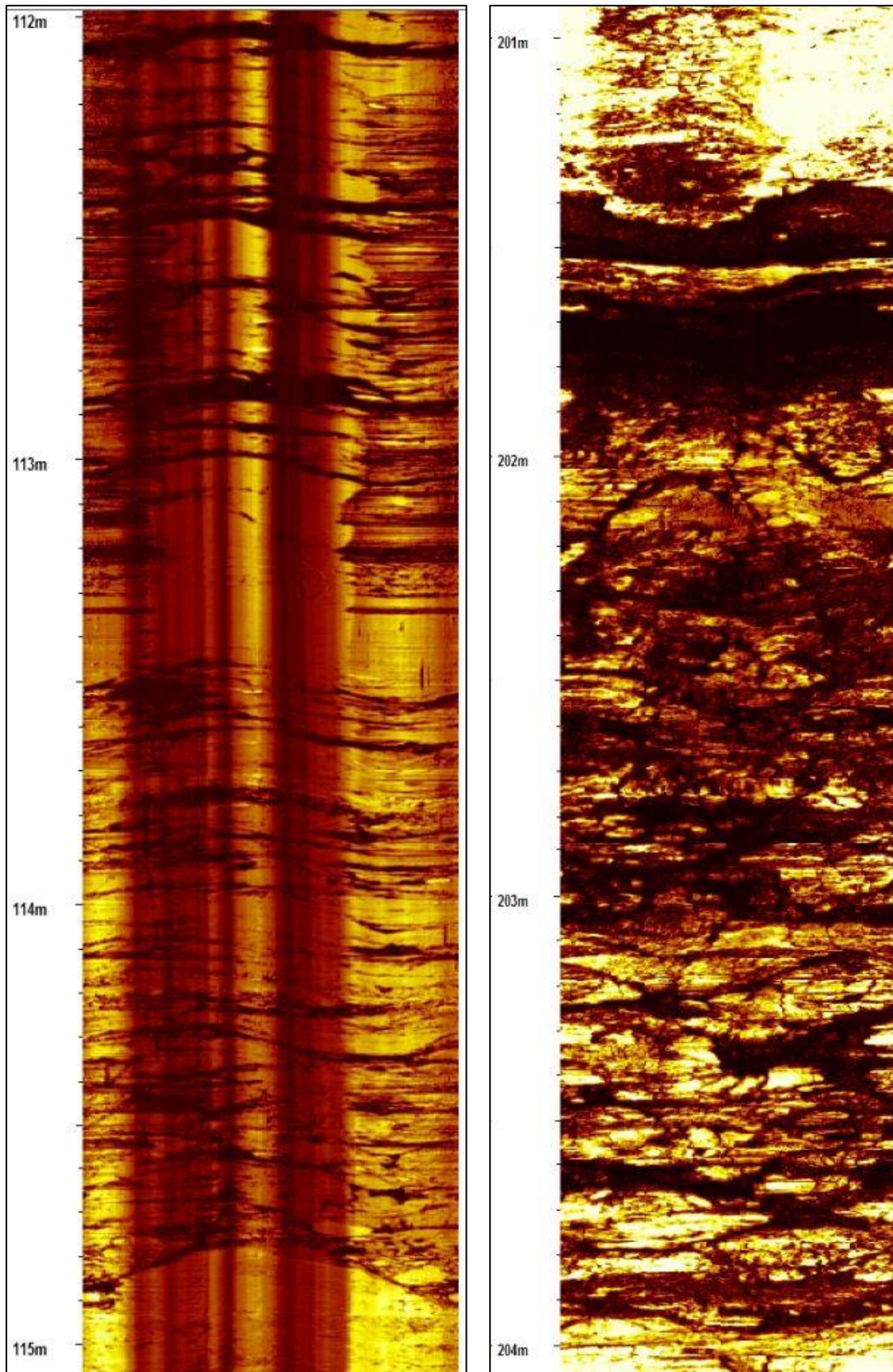
Figur 5.18. Bh 2, 90 – 150 m. Individuelle sprekker, sprekkerekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølge hastighet.



Figur 5.19. Bh2, 150 – 215 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølgehastighet.



Figur 5.20. Foliasjon i Bh2. Fallretning og fallvinkel (venstre), borehullsforløp med fallvinkel (høyre).



Figur 5.21. Akustisk bilde Bh 2, 112-115 m i sedimentære bergarter (venstre) og 201-204 m i grunnfjell (høyre).

5.3 Resultater Bh 3

Bh 3 ble boret og logget i februar 2016. Myra var da frosset og en kunne lett kjøre inn borerigg og loggeutstyr. Dette hullet var boret vertikalt til 225 meters dyp. Figur 5.22 viser logging i Bh 3. Bh 3 ble boret sørvest i området, Kvalnesmyra, utenfor det som til nå har vært definert som grensen mellom sedimentære bergarter og grunnfjell. Grunnen til dette var at tolking av gravimetrisk, magnetisk og elektromagnetisk data viste at sedimentbassenget går lenger mot sørvest enn tidligere antatt.



Figur 5.22. Logging i Bh 3.

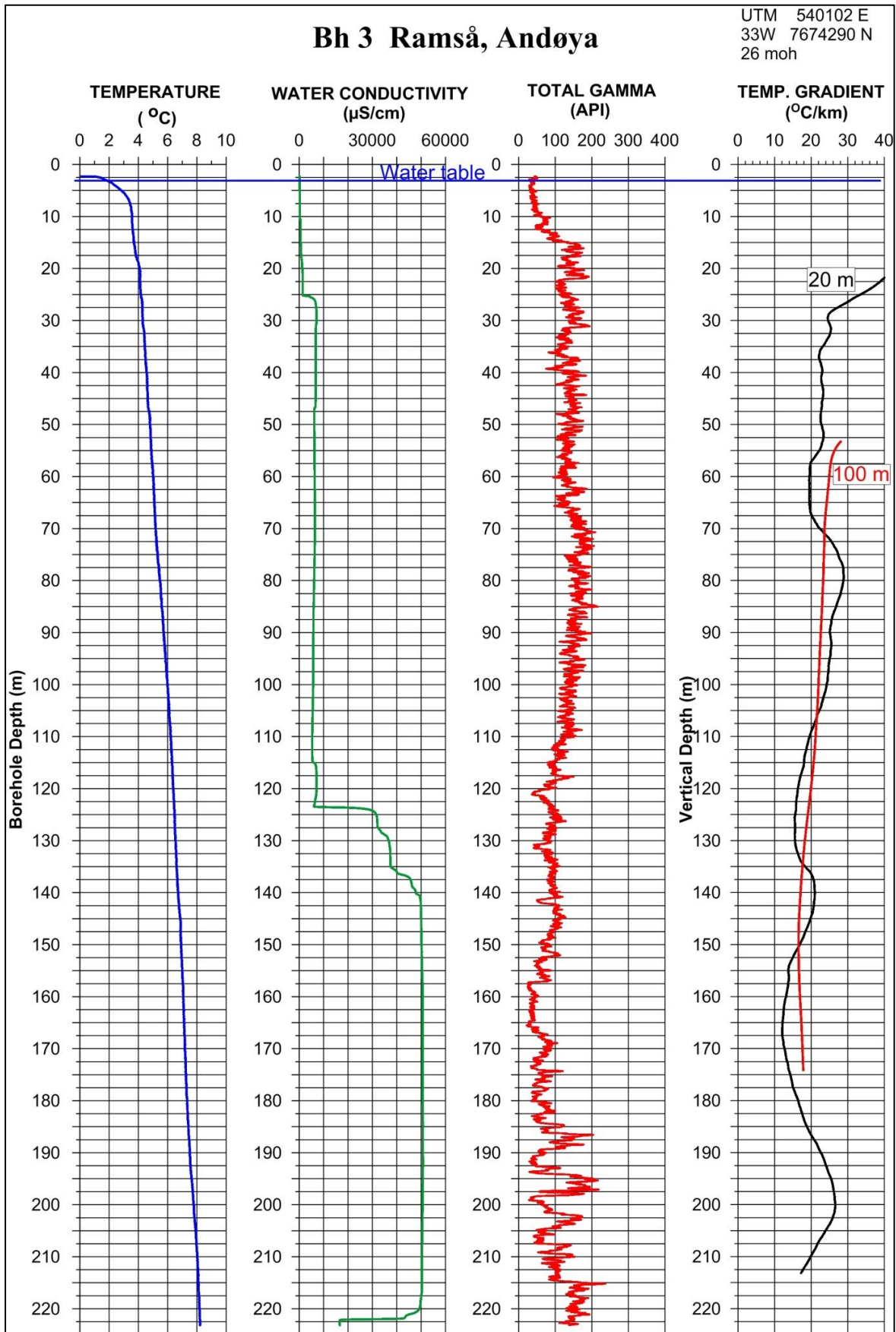
5.3.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh3.

Figur 5.23 viser temperatur, temperaturgradient, elektrisk ledningsevne i vann og total naturlig gammastråling i Bh 3. Fra temperaturdata er temperaturgradienten som viser økning i temperatur pr. km nedover i dypet beregnet. Gradienten er beregnet vertikalt for hver cm med et intervall på 20 og 100 m.

Temperaturen viser 8.2° C i bunnen av hullet. Gradienten er beregnet til ca 22 °C/km i øvre del av hullet og ca 18 °C/km i nedre del. Gjennomsnittlig gradient i Østlandsområdet er i overkant av 20 °C/km. Variasjonen i temperaturgradient skyldes trolig varierende varmeledningsevne.

Den elektriske ledningsevnen i vannet øker mot dypet. Det er ferskvann de øverste 25 m, 200 – 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Deretter øker ledningsevnen til ca 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ og ligger der til 123 m dyp. Herfra øker den kraftig til 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (resistivitet 0,2 Ωm). Dette tilsvarer rent sjøvann, og muligens saltere. Årsaken til det salte vannet er diskutert og mest sannsynlig er det fossilt vann som er ”fanget” i sedimentene. I følge A. Dalland (1975) danner de mesozoiske sedimentene en trauforn. Saltvann er tyngre enn ferskvann og saltvann i sedimentbassenget under dannelsen kan ha blitt værende i bunnen av dette trauet.

Total naturlig gammastråling ligger mellom 100 og 200 API ned til 120 m dyp. I nedre del av hullet varierer strålingen noe mer. Svekkingen de øverste 10 m skyldes casing og boring i løsmasser.



Figur 5.23. Bh 3 temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total naturlig gammastråling og beregnet temperaturgradient.

5.3.2 Gammaspektrometri, innhold av U, Th og K, Bh 3.

Figur 5.24 viser total gammastråling og innhold av U, Th og K målt med gammaspektrometri i Bh 3. Sonden stoppet ved ca 223 m dyp, og en fikk dermed logget 11 m i grunnfjell som starter ved 212 m.

Totalstråling og U, Th og K varierer forholdsvis lite ned til 110 m dyp. Herfra går alle verdier ned, men varierer mer enn i øvre del av hullet. Det er en tydelig økning i Th-innhold mot bunnen av hullet, i grunnfjell. K-innholdet er også lavt her.

5.3.3 Seismisk hastighet, Resistivitet, Magnetisk susceptibilitet, IP og SP, Bh 3

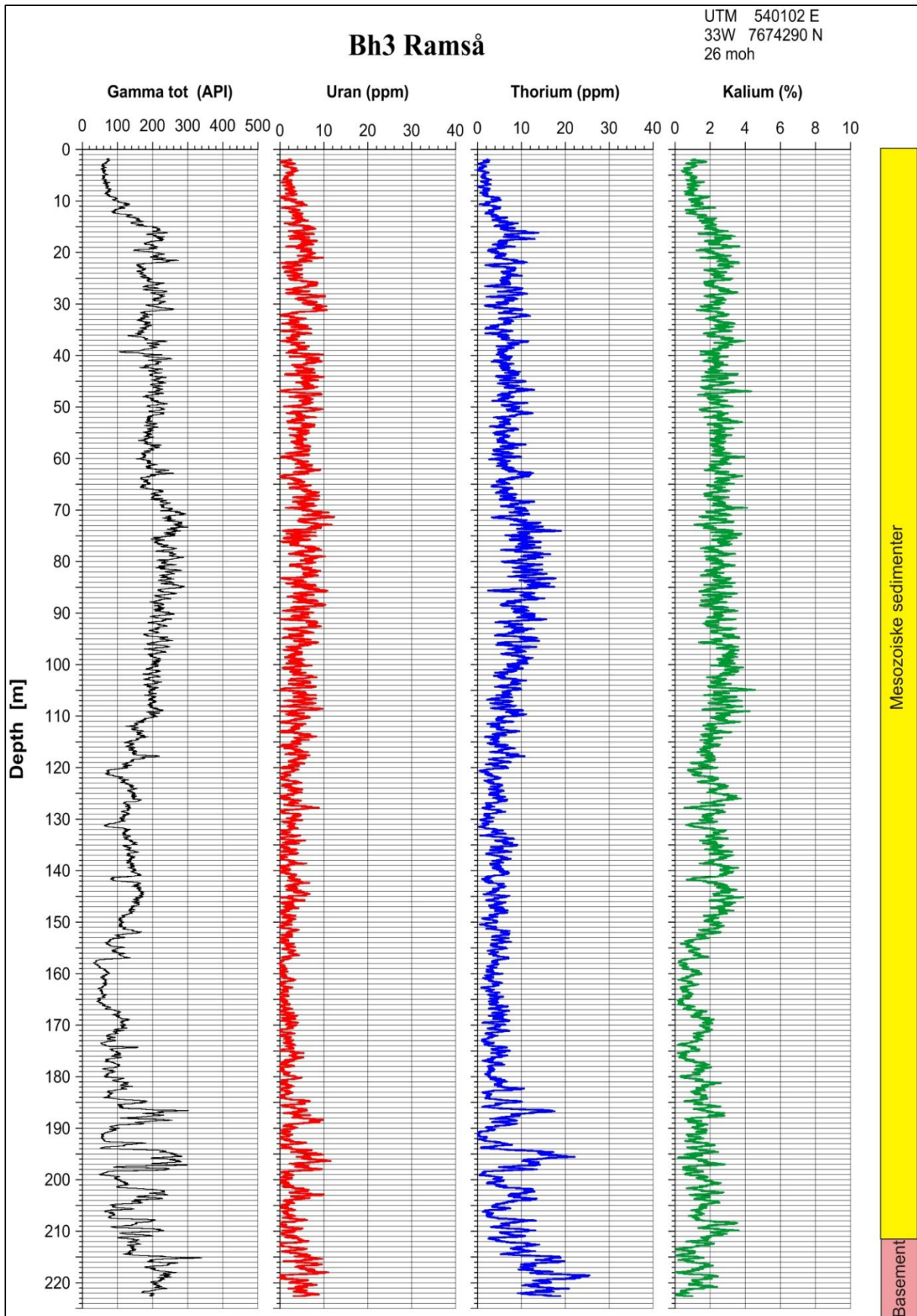
Figur 5.25 viser logger for seismisk hastighet (P-bølge), total naturlig gamma, resistivitet, magnetisk susceptibilitet, industert polarisasjon (IP), og selvpotensial (SP). Gammastråling er omtalt i kapittel 5.3.1 og 5.3.2.

Seismisk P-bølgehastighet er lav i de øverste 90 m av hullet, 2000 – 3000 m/s. Dette tyder på sterkt oppsprukket og/eller lite konsolidert bergart. Under 90 m er hullet lite oppsprukket (se senere akustisk televiwer). Hastigheten øker gradvis og ligger i overkant av 3000 m/s ned til grunnfjell på 212 m. Dette synes å være en normal P-bølgehastighet for disse sedimentære bergartene. I grunnfjell øker hastigheten til ca 4000 m/s. Det observeres flere topper der hastigheten øker opp mot 6000 m/s. Dette er bånd av kalsitt (karbonater) da gammastrålingen går ned og resistiviteten øker på de samme steder (personlig meddelelse, Alf Ryseth, Statoil).

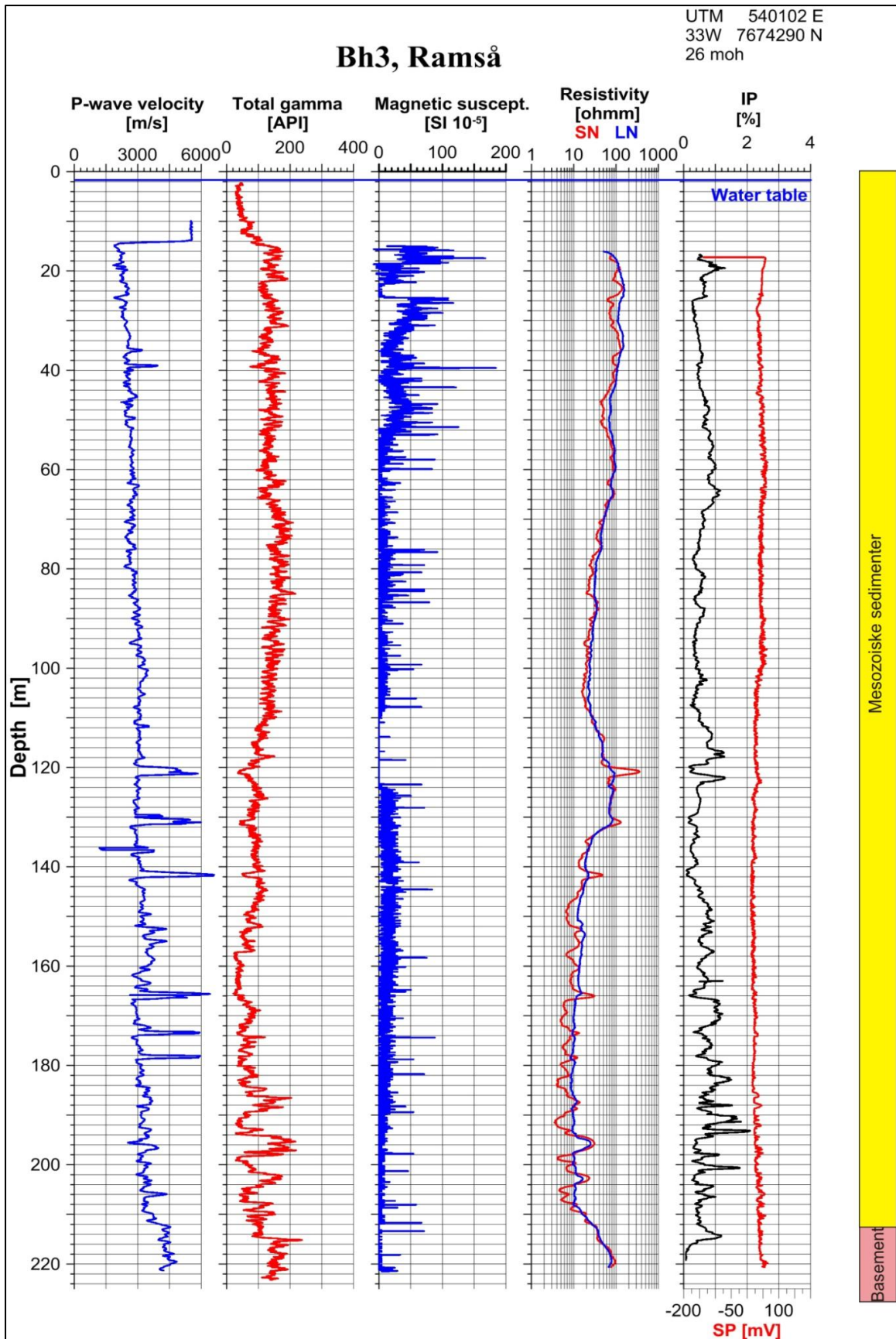
Resistiviteten er generelt svært lav, fra ca 100 Ωm og ned mot verdier under 10 Ωm i nedre del av hullet. Fra ca 140 m er det svært høy ledningsevne i porevannet (sjøvann) og dette påvirker resistivitetsverdiene. En ser imidlertid lokale variasjoner, som ved nevnte kalsittbånd. Resistiviteten øker tydelig når en kommer inn i grunnfjell, (gneis), men en resistivitet på under 100 Ωm i gneis avspeiler det salte grunnvannet. Akustisk televiwer viser at grunnfjellet ikke er spesielt oppsprukket i de få meterne som er logget. Mineralogiske og kjemiske analyser viser at grunnfjell er dypforvitret (RABIS-prosjekt).

Magnetisk susceptibilitet er høyest i de øverste 50-60 m, $10 - 100 \text{ SI } 10^{-5}$. Susceptibiliteten er generelt lavere enn i Bh 1 og Bh 2. Den er spesielt lav i grunnfjellet.

Industert polarisasjon viser lave verdier i hele hullet, for det meste under 1 %. I nedre del av hullet, fra ca 160 m, varierer den fra 0,5 til 2 %. Hullet er lite oppsprukket i dette området og det er lite som tyder på forvitret bergart hvor leire kan opptre og gi forhøyet IP. Det kan være pyritt, noe som er observert i kjernene (personlig meddelelse Alf Ryseth, Statoil).



Figur 5.24. Bh 3, Total gammastråling, U, Th og K-innhold målt ved gammaspektrometri.



Figur 5.25. Bh 3. Seismisk hastighet, total gammastråling, magnetisk susceptibilitet, resistivitet, IP og SP.

5.3.4 Akustisk televierer, sprekkekartlegging og beregning av foliasjon, Bh 3

Bh 3 ble logget med akustisk televierer til 223 m dyp og en fikk dermed logget 11 m i grunnfjell (fra 212 m). Alle observerte sprekker er digitalisert med beregning av fallretning og fallvinkel. Det er laget sprekkefrekvenshistogram og rosedigram.

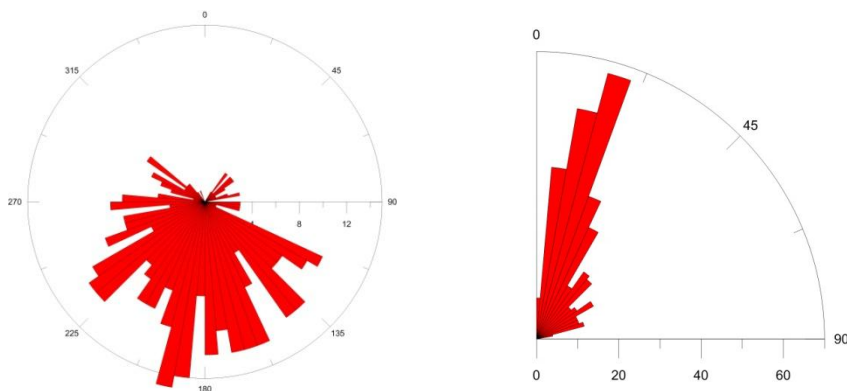
Figur 5.26 viser rosedigrammer av indikerte sprekker med plott av fallretning (asimut) og fallvinkel. Fallretningen varierer mye fra sørvest til sørøst og fallvinkel er 10 - 15°. Med slakt fall er det "lite som skal til" før fallretningen endrer seg.

Figur 5.27, 5.28 og 5.29 viser individuelle sprekker, sprekkefrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P-bølge hastighet for Bh 3. Hullet er sterkt oppsprukket ned til 100 - 105 m med sprekkefrekvenser opp mot 6 - 8 sprekker pr.m. Dette er i sedimentære bergartene. Under dette dyp er oppsprekningen svært liten. Under 212 m (grunnfjell) er det få sprekker. Som nevnt foran er det påvist forvitring i grunnfjellet i Bh 3.

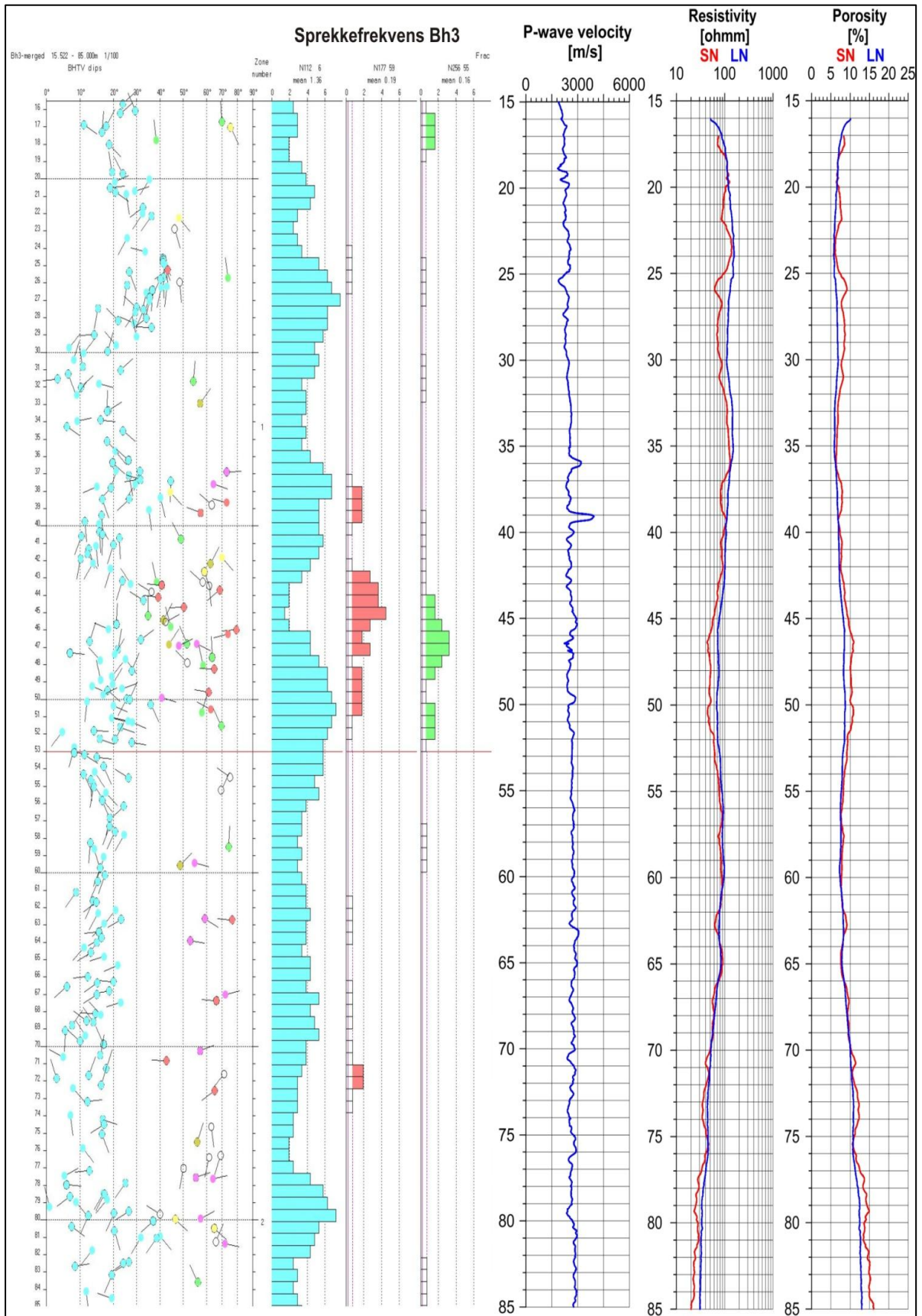
I mesteparten av hullet kan en på det akustiske bildet se tydelig foliasjon i de sedimentære bergartene. En benytter samme grunnlagsdata som ved sprekkekartlegging og digitaliserer foliasjonen som en sprekke. På samme måten som for sprekker kan en da beregne fallretning og fallvinkel. Figur 5.30 (venstre) viser beregnet fallretning og fallvinkel plottet mot dyp. Til høyre vises borehullsforløp og plottet fallvinkel. Borehullsretning og foliasjonens fallretning er også vist i rosedigram. Borehullet er loddrett med lite avvik, ca 4 m i bunnen mot sørøst.

Sedimentene faller mot sør-sørvest med et gjennomsnittlig fall på 10 - 20° i de øverste 100 m av hullet. Nedre del har en fallvinkel på 7 - 15°. Fallretning er mot sør sør-vest.

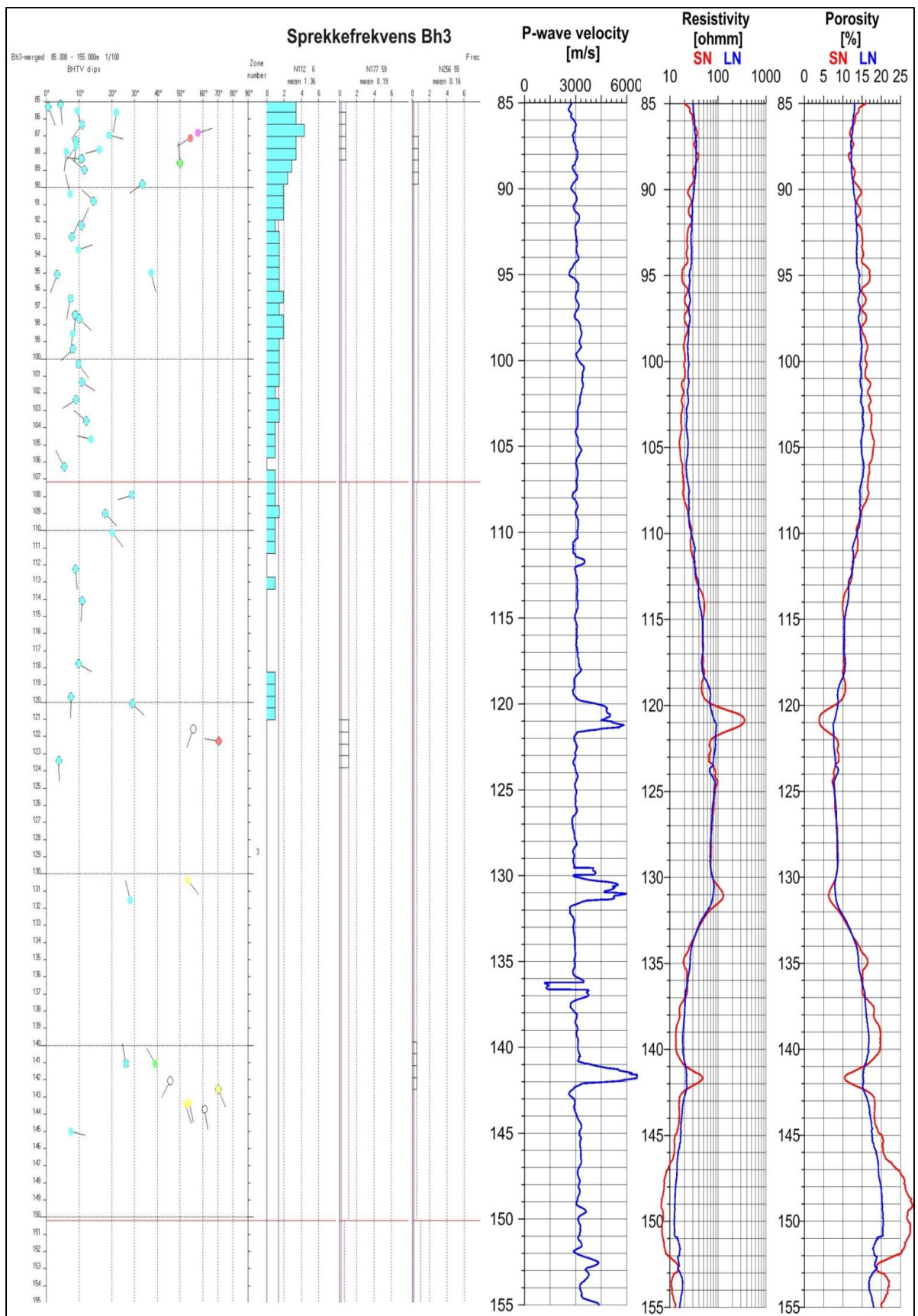
Figur 5.31 viser akustisk bilde av Bh3, 36-39 m, 77-80 m og 129-132 m dyp. Bildene viser tydelig sprekker i de sedimentære bergartene mens det ved ca 131 m observeres et ca 1 m tykt bånd som indikeres med lys farge (mindre dempet signalamplitude). Dette båndet gir høy P-bølge hastighet, forhøyet resistivitet og lav gammastråling og utgjør et kalsittbånd. Flere slike bånd indikeres på samme måte.



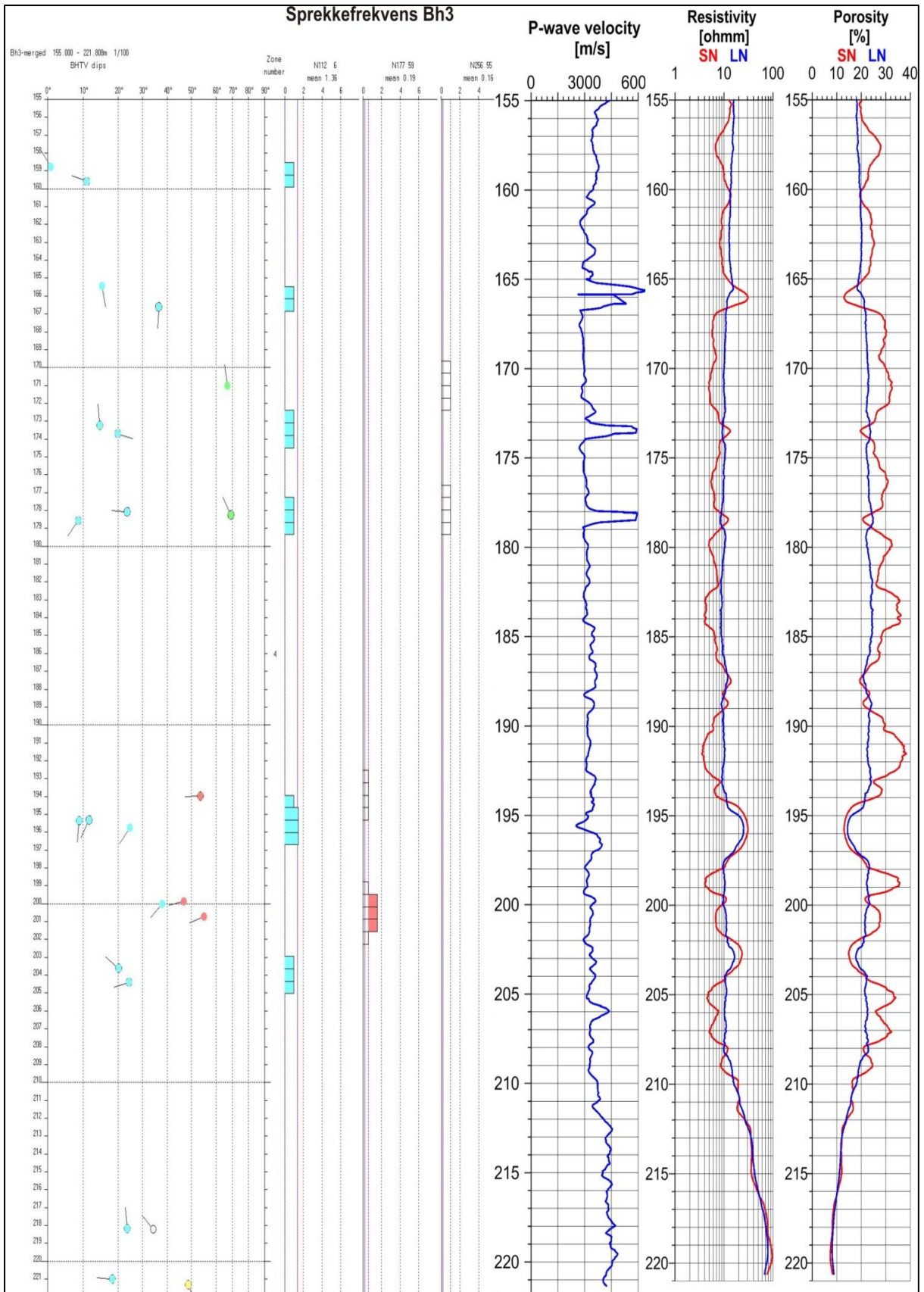
Figur 5.26. Rosedigram over indikerte sprekker i Bh 3 (venstre) og fallvinkel (høyre).



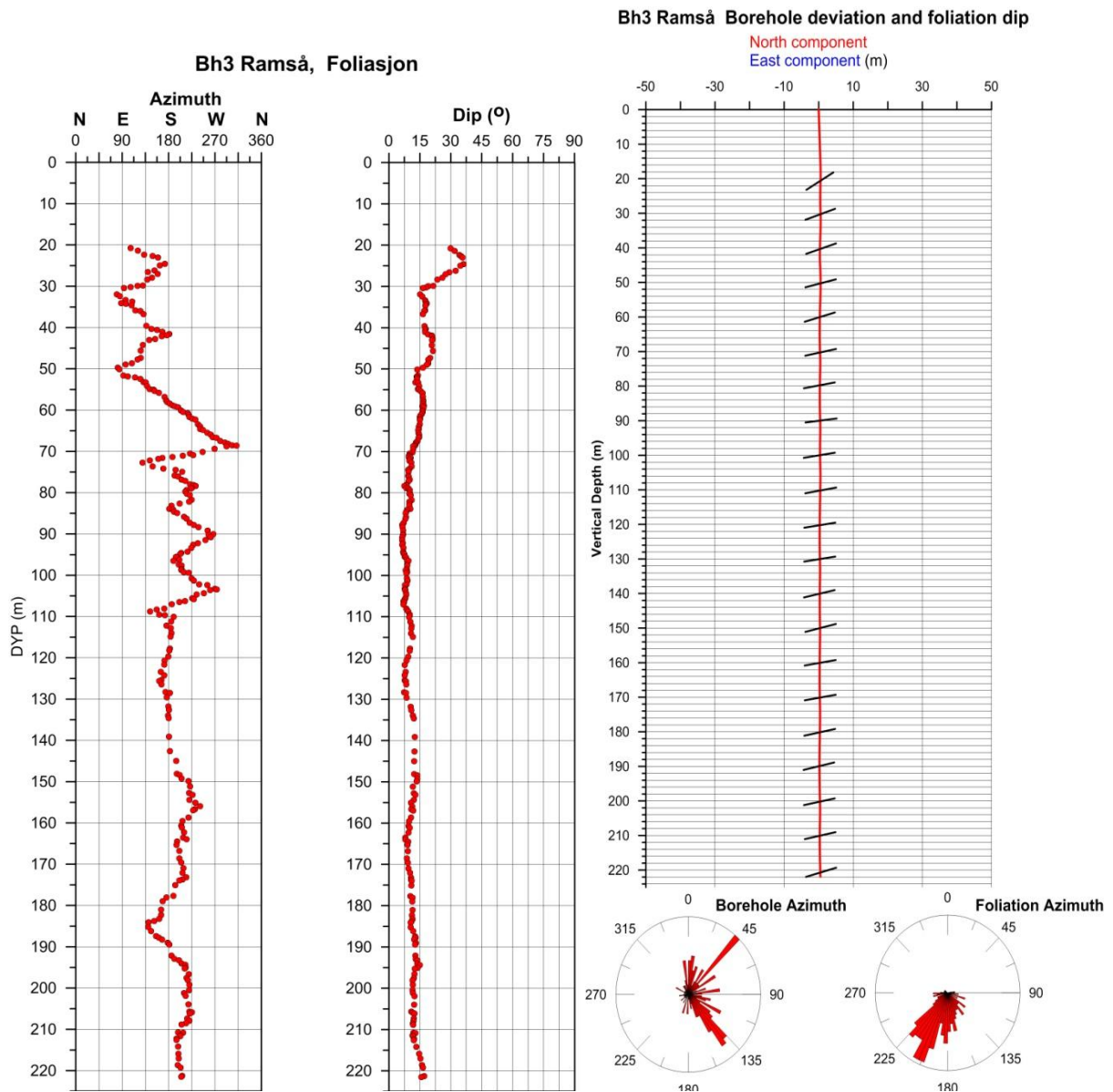
Figur 5.27. Bh 3, 15 – 85 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P-bølge hastighet.



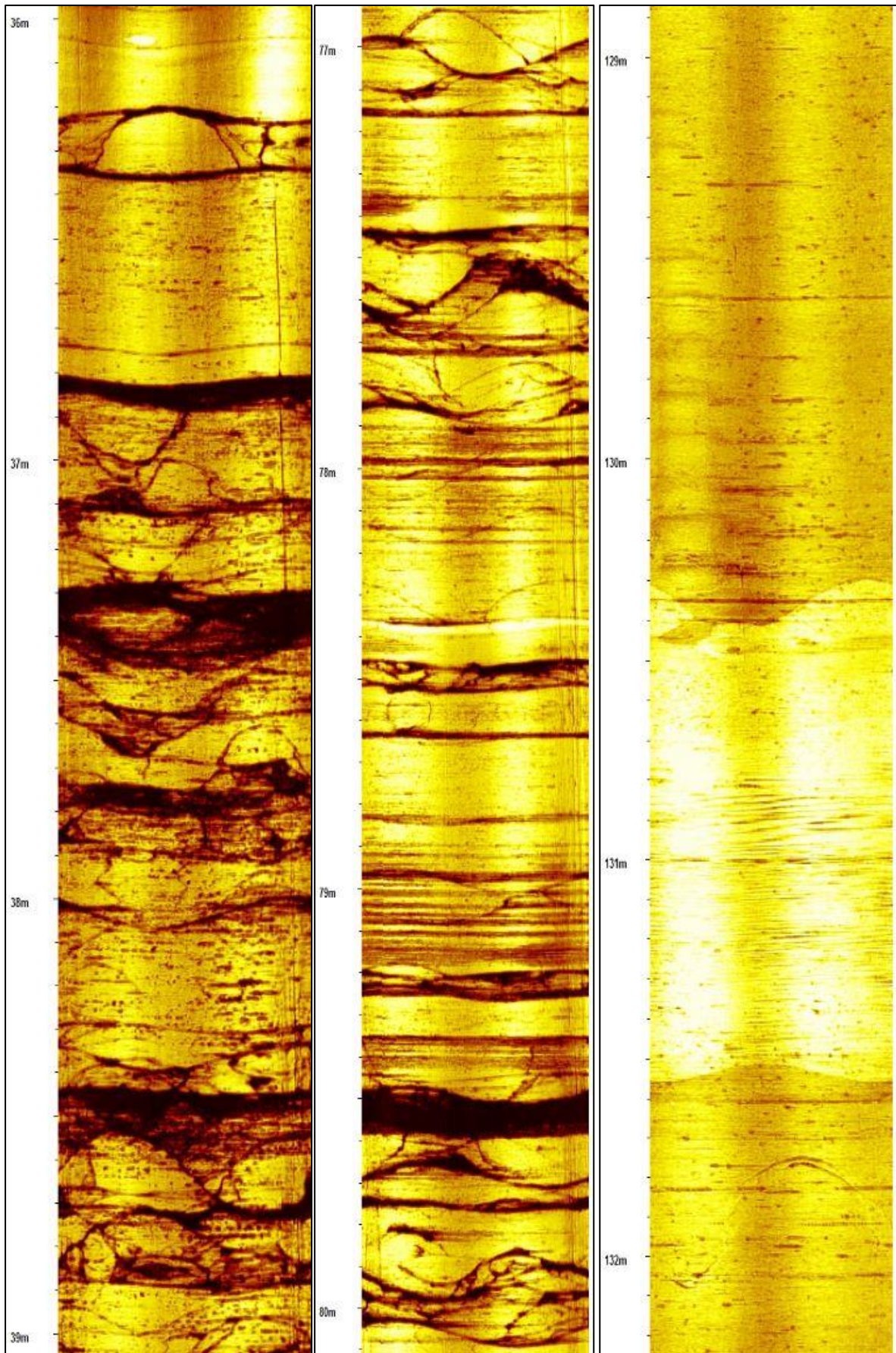
Figur 5.28. Bh 3, 85 – 155 m. Individuelle sprekker, sprekkfrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølgehastighet.



Figur 5.29. Bh 3, 155 – 222 m. Individuelle sprekker, sprekkefrekvenshistogram, resistivitet, tilsynelatende porøsitet og P- bølgehastighet



Figur 5.30. Foliasjon i Bh 3. Fallretning og fallvinkel (venstre), borehullsforløp med fallvinkel (høyre).



Figur 5.31. Bh 3. Akustiske bilder fra 36-39 m, 77-80 m og 129-132 m dyp. Kalsittbånd 130.5 – 131.5 m.

5.4 Resultater Bh 4

Figur 5.32 viser boring av Bh 4 sør for gammel militærleir, helt sør i Ramsåfeltet. Bh 4 ble boret ca 270 m sør for Bh 1 i den hensikt å kartlegge grensen til grunnfjell samt at det i nærheten var observert dypforvitring i dagen. Boredyp var 53.7 m. Det ble logget temperatur, elektrisk ledningsevne i vann, total gamma og resistivitet. Resistivitetssonden satte seg fast i bunnen av hullet. Forsøk på å trekke sonden opp resulterte i at vaieren løsnet i koblingen til sonden og sonden gikk tapt. Det var etter dette ikke mulig å logge med andre sonder.



Figur 5.32. Boring av Bh 4 sør for gammel militærleir på Ramså.

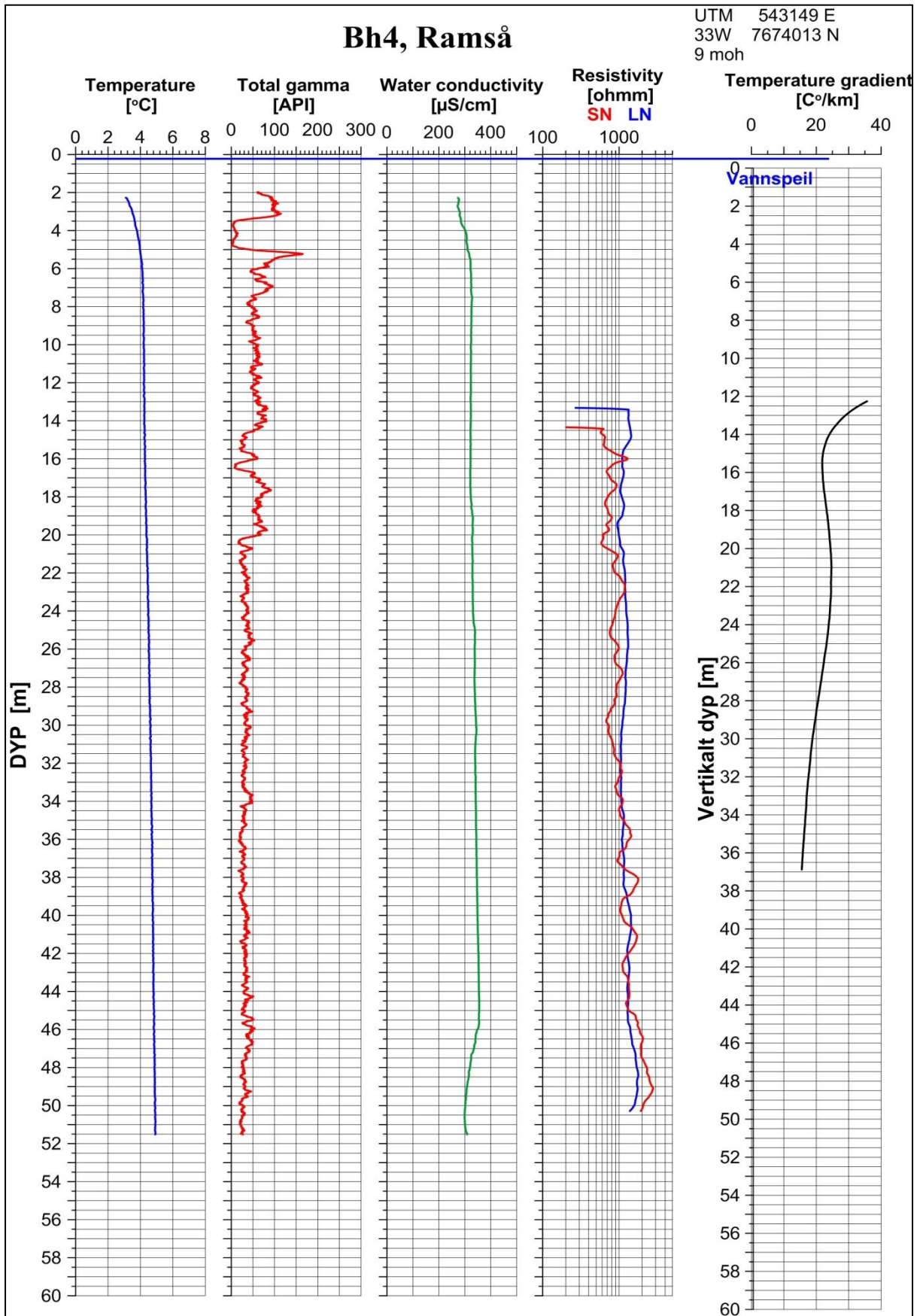
5.4.1 Temperatur, elektrisk ledningsevne i vann og total gammastråling Bh4.

Figur 5.33 viser temperatur, temperaturgradient, elektrisk ledningsevne i vann, resistivitet og total naturlig gammastråling i Bh 4. Fra temperaturdata er temperaturgradienten beregnet som viser økning i temperatur pr. km nedover i dypet. Gradienten er beregnet vertikalt for hver cm med et intervall på 20 og 100 m.

Temperaturen viser 4.9 °C i bunnen av hullet (51.5 m). Gradienten (intervall 20 m) er beregnet til ca 22 °C/km i øvre del av hullet og ca 16 °C/km i nedre del. Etter all sannsynlighet er disse verdiene påvirket av paleoklima. Gjennomsnittlig gradient i Østlandsområdet er i overkant av 20 °C/km. Ledningsevnen i vannet er litt over 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dette er vanlig ferskvann som ikke er påvirket av sjøvann.

Total gamma varierer noe ned til 20 m dyp. Den er spesielt lav fra 3.5 – 5 m dyp, 2 – 10 API. Under 20 m er strålingen konstant og lav, 30 – 40 API.

Resistiviteten ligger på 700 – 1500 Ωm helt til ca 44 m dyp der den øker gradvis opp mot 3000 Ωm . En bergart hvor porevannet ikke er salt, med en resistivitet på under 1000 Ωm kan bety at bergarten er oppsprukket.



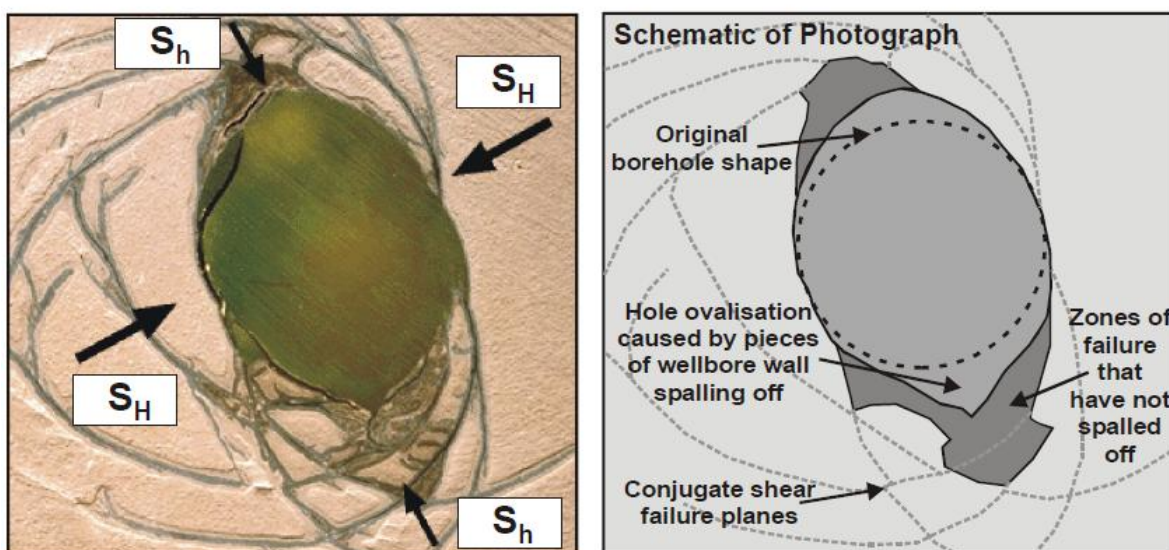
Figur 5.33. Bh 4. Temperatur, total gammastråling, elektrisk ledningsevne i vann, resistivitet i berg og beregnet temperaturgradient.

5.5 Ovalisasjon og borehullsdiameter, caliper 4, med akustisk televiver.

Ovalisasjonslogg viser eventuell deformering av borehullet. Loggen viser forholdet mellom maksimum (alpha) og minimum (beta) borehullsdiameter (normalisert mot gjennomsnittlig diameter). Dersom horisontalspenninger deformerer borehullet kan det føre til oppsprekking (breakouts) vinkelrett på største hovedspenning. Retningen til alpha (største diameter eller breakouts) kan bestemmes og dermed retningen til største hovedspenning.

Caliper 4 logg beregner borehullsdiameter i to retninger, Ø-V og N-S. Med denne loggen (og ovalisasjonslogg) kan oppsprekking registreres. Det er toveis gangtid til en lydimpuls fra televiveren som registreres. Treffer pulsen en sprekk vil toveis gangtid øke hvilket betyr at borehullets diameter øker.

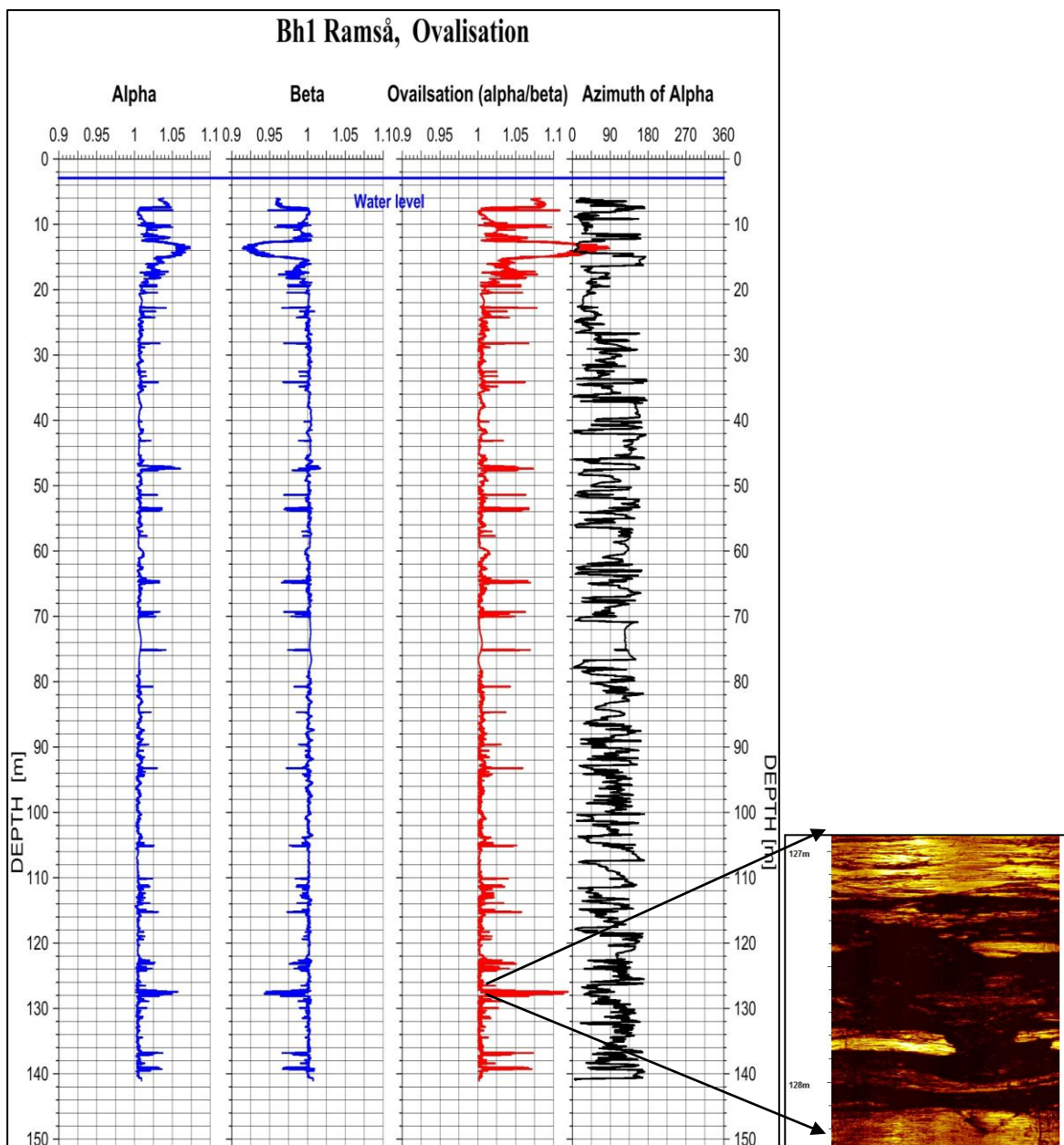
Noen grunnprinsipper for spenningsberegninger ut fra ovalisasjon og breakouts er beskrevet av Reinecker (Reinecker et al. 2003). "Breakouts" er stressrelatert økning av borehullsdiameteren. Når boringen gjennomføres og materiale fjernes, blir bergspenningen konsentrert i omkringliggende bergart, i borehullsveggen. "Breakouts" oppstår når bergspenningen overstiger bergartens styrke. Kryssende skjærplan oppstår og forårsaker avskalling i borehullsveggen. Avskallingen skjer vinkelrett på største spenningsretning (se figur 5.34). Største borehullsradius blir derved orientert ca. vinkelrett på største spenningsretning S_H (Plumb & Hickman 1985).



Figur 5.34. Laboratorietest som viser avskalling i borehull vinkelrett på største spenningsretning. Laboratorieforsøk foretatt ved CSIRO, Avdeling for bergmekanikk. (Fra Plumb & Hickman 1985).

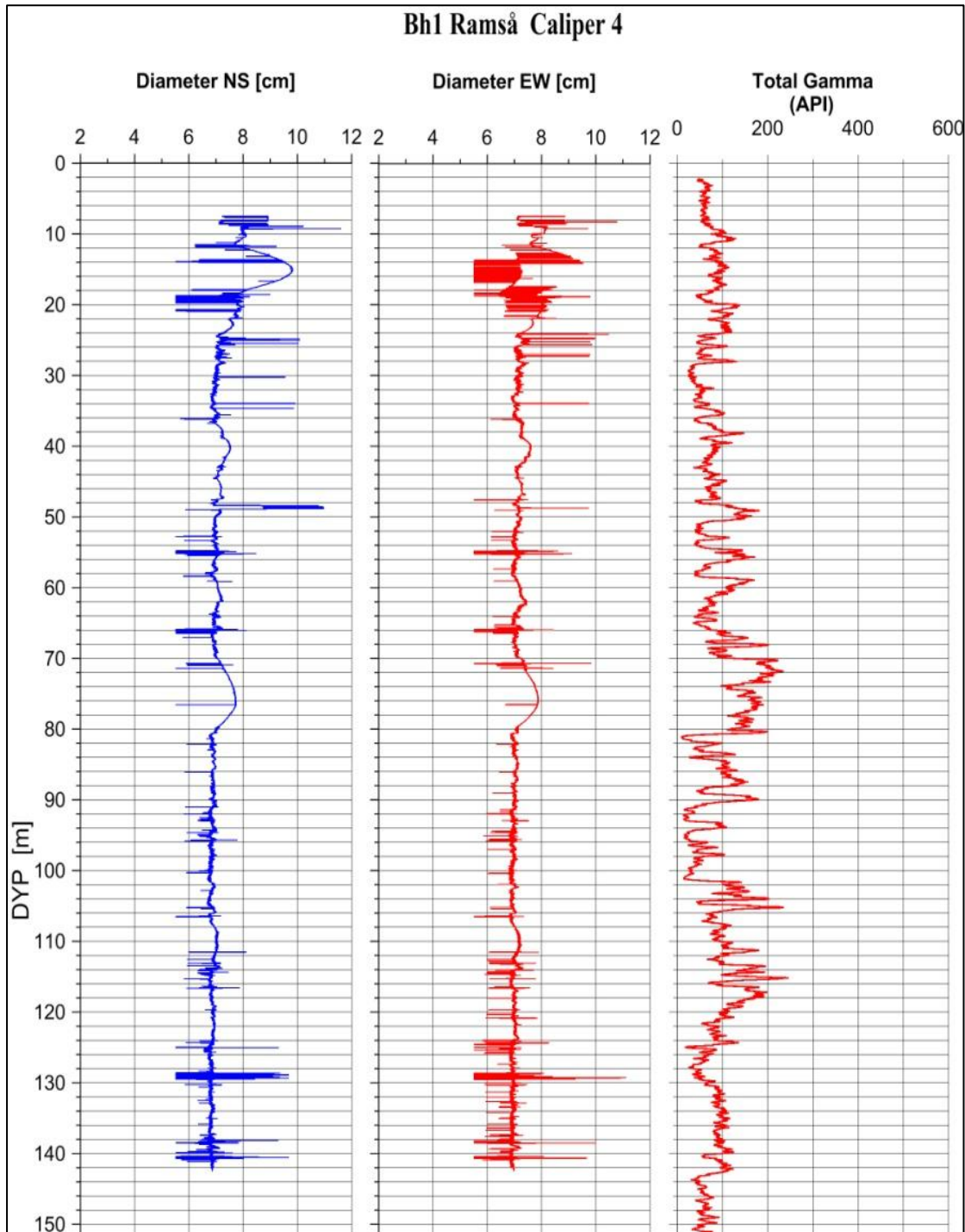
5.5.1 Ovalisasjon og Caliper4, Bh1

Figur 5.35 viser ovalisasjonslogg for Bh1. Den delen av Bh1 som ble logget med akustisk televiwer var sterkt oppsprukket noe som vises på ovalisasjonsloggen. "Azimuth of Alpha" viser retningen til største diameter. Dette er relevant der en har tydelig breakouts som vist i illustrasjonen foran. For "vanlig oppsprekking" eller enkeltsprekker som skjærer gjennom borehullet blir denne retningen rotete og gir vanligvis ingen mening. På figur 5.35 er eksempelvis vist akustisk bilde av en sprekkesone på ca 1 m tykkelse som skjærer gjennom borehullet ved 127-128 m dyp. Ovaliseringsloggen i Bh 1 viser ikke noe klart signal om spenningsretning.



Figur 5.35. Ovalisasjonslogg for Bh1. Sprekkesone ved 127-128 m vises tydelig på akustisk bilde.

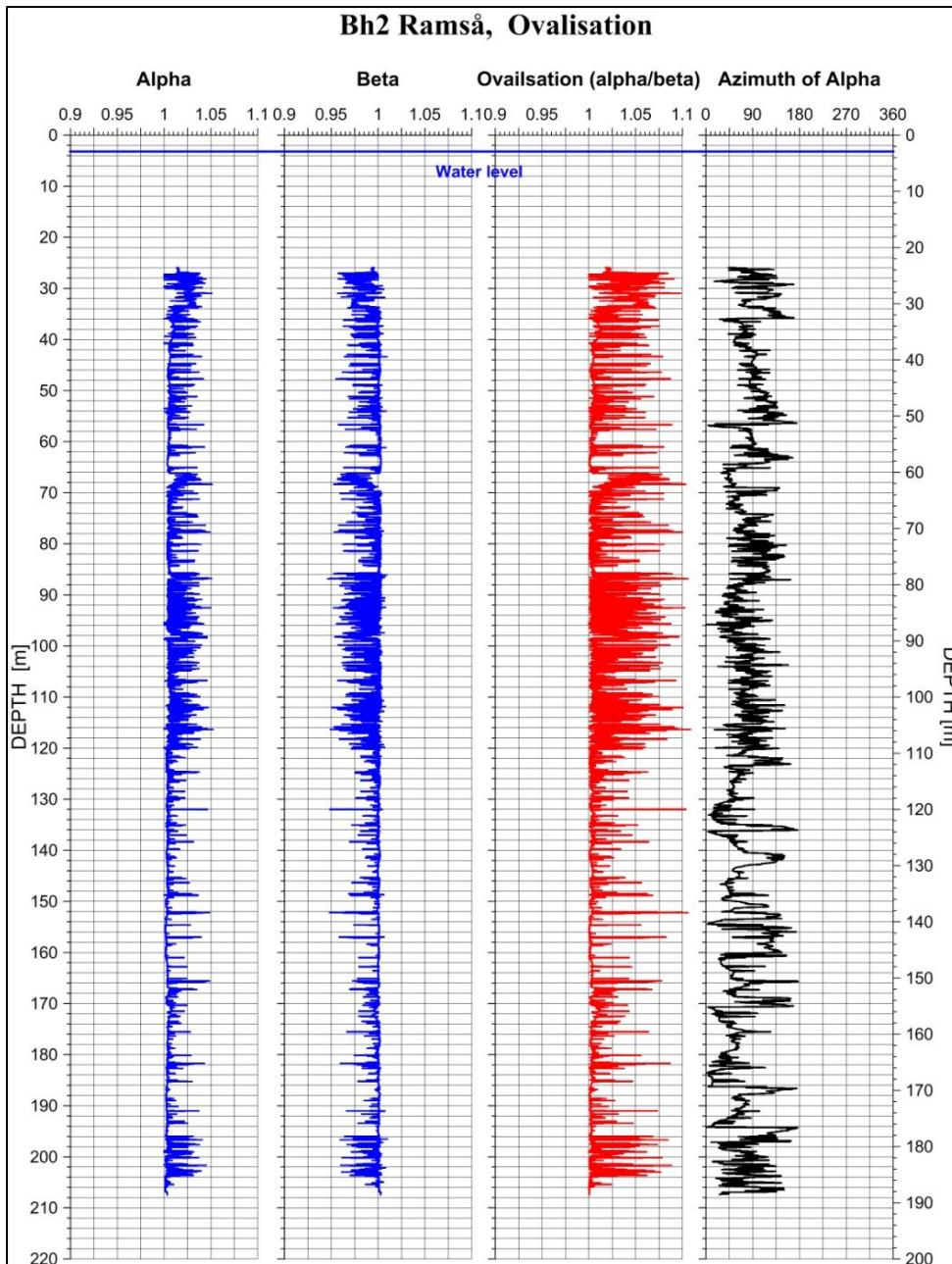
Figur 5.36 viser caliper4-logg (diameter) i to retninger, N-S og Ø-V, i Bh1. De store variasjonene mellom 10 og 20 m er støy (kunstig effekt på grunn av feil innstillinger).



Figur 5.36. Caliper4-logg (diameter) og total gammalogg, Bh 1.

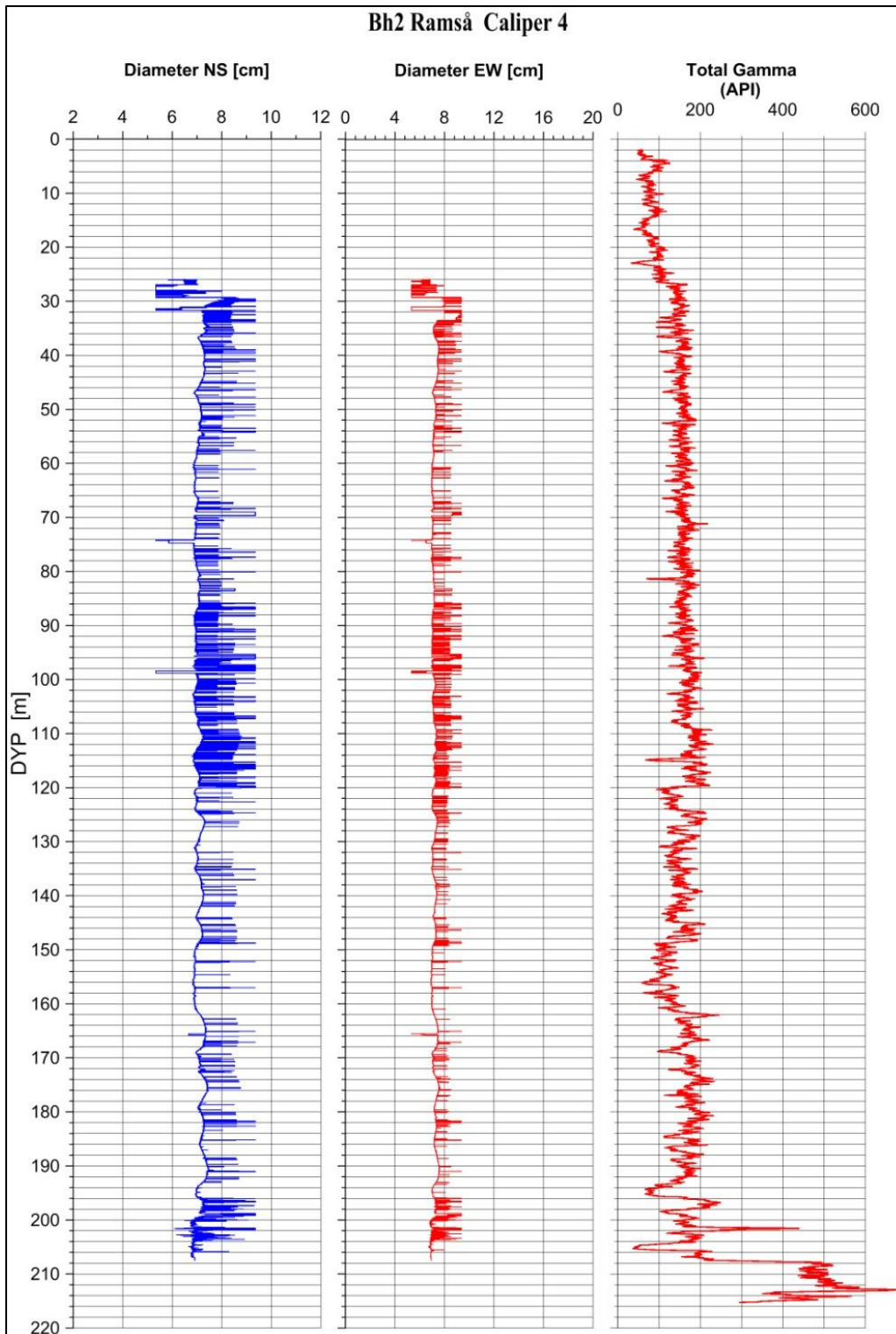
5.5.2 Ovalisasjon og Caliper4, Bh 2

Figur 5.37 viser ovalisasjonslogg for Bh 2. Hele hullet er sterkt oppsprukket noe som gjør store variasjoner på målt maksimum og minimum diameter (Alpha og Beta). På det akustiske bildet er det ikke observert typiske breakouts-mønstre slik at variasjonene skyldes en generell oppsprekking. Heller ikke i Bh 2 viser ovaliseringsloggen noe klart signal om spenningsretninger.



Figur 5.37. Ovalisasjonslogg for Bh2.

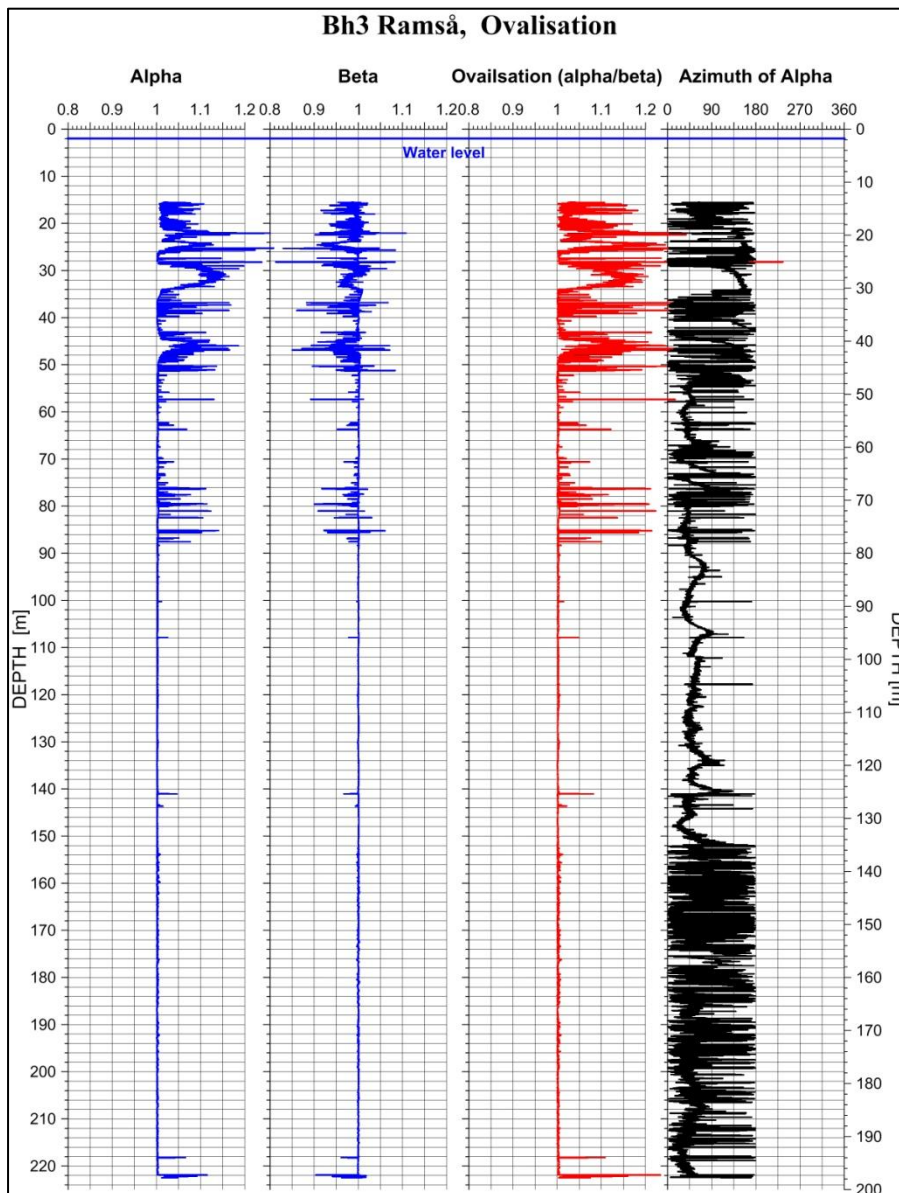
Figur 5.38 viser caliper4-logg for Bh 2, som bekrefter den sterke oppsprekningen.



Figur 5.38. Caliper4-logg (diameter) og total gamma-logg, Bh 2

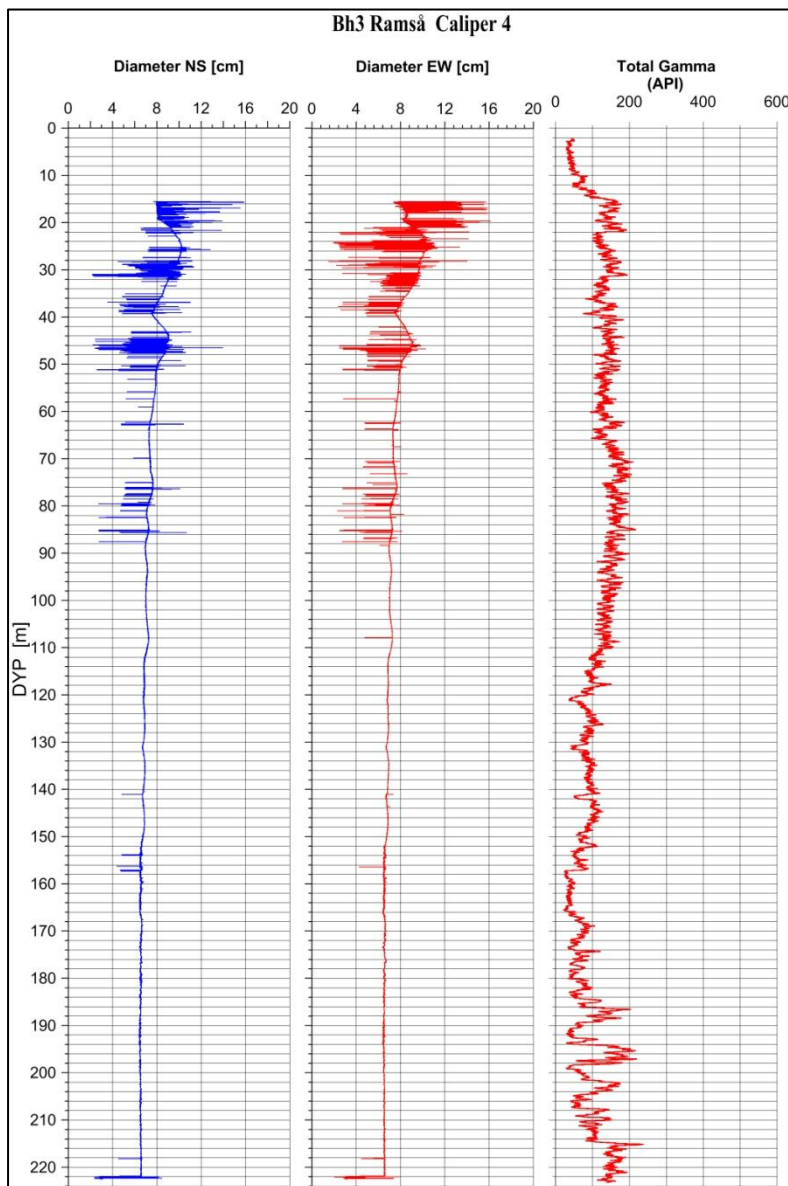
5.5.3 Ovalisasjon og Caliper4, Bh 3

Figur 5.39 viser ovalisasjonslogg for Bh3. De øverste 90 m er sterkt oppsprukket noe som er vist i kapittel 5.3.4. Mellom dypene 76 og 136 viser "Azimuth of Alfa" stabile verdier rundt 45 til 50°. Størrelsene Alpha og Beta viser imidlertid stabile forhold lik 1 og heller ikke her kan en si noe om retningen til hovedspenning.



Figur 5.39. Ovalisasjonslogg for Bh3.

Figur 5.40 viser caliper4-logg i Bh 3 og bekrefter oppsprekningen ned til ca 90 m dyp. Boret diameter er 7.6 cm. En ser at flere steder er denne beregnet mye mindre, ned mot 4 cm. Dette er lite trolig. En antar at dette skyldes den kraftige oppsprekningen og åpne sprekker som gir falske responser.



Figur 5.40. Caliper4-logg (diameter) og total gammalogg Bh 3.

6. OPPSUMMERING

På nordøstlige Andøya på en ca 6 km bred strandflate mellom Ramså og Skarstein ligger sedimenter av mesozoisk alder som de eneste bergarter av denne alder i Norge. Feltet er ca 8.4 km langt og består av bergarter fra nedre kritt og midtre/øvre jura. I NGU-prosjektet RABIS: *An integrated study of the Ramså basin on Andøya, northern Norway*, er det boret 4 hull i den sørlige delen av feltet. Hensikten med boringene er å få økt kunnskap om utvikling og tektonisk ramme av Ramså Bassenget og å kartlegge fordeling av forvitret grunnfjell som er blottet langs fjæra på den sørlige bassengkanten ved utløpet av Nordelva.

Generell forvitring og spesielt dypforvitring er en viktig del av forundersøkelser for tunneler. Petrofysiske egenskaper som seismisk hastighet, resistivitet, magnetisk susceptibilitet og induert polarisasjon (IP) kan alle påvirkes av forvitningsprosesser. For å bedre forstå hvordan disse egenskapene varierer i forvitret berg, ble de fire borehullene på Andøya logget geofysisk med støtte fra Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Det var da av spesiell interesse å se på overgangen fra de sedimentære bergartene til grunnfjell der det er påvist forvitring.

Ideelt sett skulle alle de fire borehullene gå gjennom de mesozoiske sedimentære bergartene, gjennom en forvitringssone og ned i friskt grunnfjell. Ved logging skulle en derved få kunnskap om petrofysiske egenskaper relevant for tolking av forundersøkelser for tunneler og bergrom.

Flere forhold påvirket gjennomføringen av loggeprosjektet:

- Hullene ble boret ca. 10 m ned i grunnfjellet, og det er uklart om alle kom ned i ikke forvitret berg.
- Bergartene i de fire borehullene var sterkt oppsprukket og dette hindret loggingen. Flere hull hadde rast, og det var ikke mulig komme til bunnen med alle sonder.
- Porevannet var til dels meget salt og nær alle resistivitetmålinger ble påvirket av dette slik at måleverdiene ikke ble relevante for tunnelundersøkelser generelt.
- Mineralogiske og kjemiske analyser av kjernematerialet er konfidensielle data ut 2017. Endelig korrelasjon mellom loggeparametre og geologi kan først sammenstilles når data frigis.

Generelt kan en konkludere med at loggingen av borehullene ikke ga den kunnskapen en forventet på forhånd. Seismisk p-bølgehastighet ble målt til ca. 4000 m/s i forvitret berg noe som er lavere enn forventet i aktuelle bergart. Resistiviteten ble påvirket av salt porevann og viser verdier som er lite relevant for undersøkelser i tunnelprosjekt. Magnetisk susceptibilitet i grunnfjell viser til dels svært lave verdier i grunnfjell, men det er uklart om dette skyldes lavt magnetittinnhold i frisk bergart eller om det skyldes forvitring. Indusert polarisasjon (IP) viser ingen klare anomalier på leiromvandling i forvitret fjell. Undersøkelsen har gitt mye kunnskap om de sedimentære bergartene i Ramsåfeltet.

Temperaturgradienten er forholdsvis høy, 20-30° C/km. Dette er over gjennomsnittet i fastlands Norge.

7. REFERANSER

Advanced Logic Technology, 2006: WellCAD, FWS processing, version 4.1.

Archie, G.E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Technology*, 5, 1422 – 1430.

Brantley, S.L., Goldhaber, M.B., and Ragnarsdottir, V. 2007: Crossing disciplines and scales to understand the Critical Zone. *Elements* 3, 307-314.

Elvebakk, H. 2011: Sammenstilling av resistivitet, seismiske hastigheter og naturlig gammastråling I norske bergarter. *NGU Rapport 2011.042*.

Elvebakk, H. 2013: Geofysisk logging av borehull ved Geologisk Museum, Tøyen, Oslo. *NGU Rapport 2013.040*.

Dalland, A. 1974: Geologisk undersøkning av den Mesozoiske lagrekke på Andøy, Nord-Noreg; Hovudfagsopp. i mineralogi/petrografi, Geologisk institutt avd. A, Universitetet i Bergen.

Dalland, A. 1975: The Mesozoic rocks of Andøy, northern Norway. *Norges geologiske undersøkelse* 316, 271-287.

Midbøe, P. 2007: Geologiske innføring til Ramsåfeltet, Andøya og Sortlandsund-bassenget, Internt Statoil-notat, 22 pp

Nilssen, O. 2005: Ramsafeltet på Andøya. Bergverksaktivitet gjennom tidene. http://www.vesteraalen.info/andoy_hovedside.htm

Olesen, O. 2006: Aktsomhetskart for tunnelplanlegging, Østlandsområdet, Geofysisk tolkning av dypforvitring, Scale 1:100,000. *Norges geologiske undersøkelse*, Trondheim.

Olesen, O., Dehls, J.F., Ebbing, Henriksen, H., Kihle, O. & Lundin, E. 2007: Aeromagnetic mapping of deep-weathered fracture zones in the Oslo Region – a new tool for improved planning of tunnels. *Norwegian Journal of Geology* 87, pp. 253 - 287.

Olesen, O. & Rønning, J.S. 2008: Deep weathering: Past climates cause tunnel problems. *Gråsteinen* no. 12. Geological Survey of Norway, Trondheim.

Olesen, O., Bering, D., Brønner, M., Dalsegg, E., Fabian, K., Fredin, O., Gellein, J., Husteli, B., Magnus, C., Rønning, J.S., Solbakk, T., Tønnesen J.F. & Øverland, J.A. 2012: Tropical Weathering In Norway, TWIN Final Report. *NGU Report 2012.005*, 188 pp.

Plumb, R.A., and Hickman, S.H. 1985: Stress-induced borehole enlargement: a comparison between the four-arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well. - *J. Geophys. Res.*, 90, 5513-5521.

Reinecker, J., Tingay, M. & Müller, B. 2003: Borehole breakout analysis from four-arm caliper logs. *University of Karlsruhe, Geophysical Institute. World Stress Map Project*.

Reusch, H. 1903: Nogle optegnelser fra Andøen. *Norges geologiske undersøkelse*, vol. 36.

Robertson Geologging Ltd. 2004. Interpretation manual. RGLDIP version 6.2.

Thunehed, H. & Olsson, O. 2005: Borehole Corrections for a Thick Resistivity Probe. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, Vol. 9, Issue 4, pp. 217- 224.



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
- NGU -

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse
Leiv Eirikssons vei 39
7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00
E-post ngu@ngu.no
Nettside www.ngu.no