

Boring av 800 meter dype energibrønner i Asker

Uttesting av boreteknologi og
laboratoriemetoder for boreslitasje

Mette Nordmark Bones

Petroleumsfag

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Randi Kalskin Ramstad, IGB

Medveileder: Bjørge Brattli, IGB

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk

OPPGAVETEKST

Tittel: Boring av 800 meter dype energibrønner i Asker – uttesting av boreteknologi og laboriemetoder for boreslitasje

Student: Mette Nordmark Bones

Bakgrunn

Det er nettopp boret to 800 meter dype energibrønner på Føyka i Asker. Energibrønnene er boret av Båsum boring AS. Arbeidet i Asker består av et utviklingsprosjekt og bygging av et demonstrasjonsanlegg. Utviklingsprosjektet er støttet av Innovasjon Norge, mens byggingen av demonstrasjonsanlegget er støttet av Enova. I utviklingsprosjektet vil det bli utviklet og uttestet risikoreduerende tiltak for boring av dypere brønner. Dette gjelder tiltak for å kunne håndtere ras i borehullet, og være i stand til å bore videre selv om ras oppstår.

Boreteknologien som brukes er slaghammerboring med høyt lufttrykk (60 bar, booster) og rotasjonsboring med stor rigg. I prosjektet vil man også teste og utvikle boring med PDC-borekrone (PDC – polycrystalline diamond compact), og andre boreteknologier.

Det skal installeres en ny type kollektor i de to dype energibrønnene. Dette er en såkalt koaksialkollektor (rør-i-rør). Videre skal brønnene instrumenteres med optisk fiberkabel for kontinuerlig måling av temperatur. I tillegg til å måle den naturlige temperaturen i borehullet, skal brønnenes energi- og effektytelser testes ut.

Oppgave:

1. Litteraturstudium med beskrivelse av:
 - a. Bruk av grunnvarme med fokus på energibrønner i fjell med lukket kollektorslange
 - b. Boreteknologi relevant for prosjektet
 - c. Laboriemetoder relevant for boreslitasje (XRD, DTA, abrasjonsverdi og sliteevneparameteren VHNR (Vickers Hardness Number Rock)).
 - d. Geologiske forhold i Asker
 - e. Energi fra dype boringer i Norge – viktige forhold og potensial
2. Felt- og laboriemarbeid:
 - a. Innsamling av borekaks
 - b. Uttesting av PDC-krone
 - c. Laboriemetoder for mineralogisk sammensetning og vurdering av boreslitasje
3. Analyse og vurdering av resultater
 - a. Mineralogi
 - b. Boreslitasje
 - c. PDC-krone – muligheter og begrensninger, erfaringer
 - d. Forslag til videre utvikling og forbedringer
 - e. Spesielle utfordringer som det må tas hensyn til, og som ikke var forventet?
4. Konklusjon
5. Forslag til videre arbeid

SAMMENDRAG

«Boring av 800 meter dype energibrønner i Asker – uttesting av boreteknologi og laboratoriemetoder for boreslitasje» er en masteroppgave skrevet av Mette Nordmark Bones. Oppgaven er utført i forbindelse med faget TPG4910– Petroleumsteknologi, Boreteknologi masteroppgave, ved Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk (IPT) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er på totalt 62 sider.

Bruken av dype brønner til økt varmeeffekt fra grunnvarmebrønner er et aktuelt tema i grunnvarmebransjen i dag. Dype brønner krever mindre areal enn konvensjonelle grunnvarmebrønner (200-300 meter dype), i tillegg til at de gir økt oppvarmingskapasitet. Ved Føyka i Asker er det derfor gjennomført et pilotprosjekt som innebærer boring av to dype brønner til 800 meter. Brønnene vil være de dypeste anvendt til grunnvarmeformål i Norge noensinne. I forbindelse med boringen ble det testet ut ny boreteknologi. Hensikten med denne oppgaven var å dokumentere resultatene fra utprøving av boreteknologien, samt å teste nye metoder for å forutsi slitasje på borekroner ved boring av dype grunnvarmebrønner.

PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*)-borekroner (borekroner med diamantstøv på kutteelementet) ble testet ut under prosjektet for å finne ut om de var mer slitesterke enn de konvensjonelle rullemeiselborekronene som blir benyttet. Resultatene fra utprøvingen var dårlige, og det bør heller utvikles utstyr med lavere motstandsevne mot slitasje enn PDC for en reduksjon i kostnader tilknyttet slitasje.

For å forutsi slitasjen på borekroner ble det forsøkt å gjennomføre tester av borekaks fra begge brønnene. Testene som ble gjennomført er utviklet for boring i forbindelse med tunnelbygging og innebærte Røntgendiffraksjonsanalyse (XRD), Differensialtermisk analyse (DTA), Abrasjonsverdi (AV-test) og VHNR (*Vickers Hardness Number of Rock*). Slitasjetestene viste dårlig korrelasjon med data for virkelig slitasje, noe som kan forklares med faktorer som testene ikke tar hensyn til. Disse faktorene innebærer mineral-sammensetning, vanninnhold, kornstørrelse og bergartstype. Utvalg av materiale til testing er også en mulig feilkilde. For å bestemme om slitasjetestene kan benyttes i grunnvarmesammenheng er testing av flere brønner en nødvendighet.

ABSTRACT

"Drilling of 800 Meters Deep Geothermal Wells for Ground Source Heating in Asker – Testing of Drilling Technology and Laboratory Methods for Prediction of Wear on Drill Bits" is a master thesis written by Mette Nordmark Bones. The thesis is presented as the final result of the course TPG4910 - Master Thesis in Drilling Technology, at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics. The thesis contains a total of 62 pages.

Drilling of deeper wells to increase the heating capacity of geothermal wells is an important topic for the future of ground source heating systems. Deeper wells require less area than conventional wells (200-300 meters deep), in addition to giving the increased heating capacity. Two deep wells of 800 meters depth were drilled next to Føyka in Asker in a project supported by Asker Municipality, Båsum Boring AS and Asplan Viak AS. The wells will become the deepest used for ground source heating in Norway if they provide the required heating capacity. The project also involved testing of new drilling technology in deep wells. Documentation of results from the tests, along with testing of methods to predict wear on drill bits, was the aim of this thesis.

Testing of PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*) drill bits were a part of the project at Føyka. The aim was to investigate whether they would experience less wear, compared to conventional roller cone bits. The drill bit was broken after drilling just a few meters in the formation, which resulted in the conclusion that it was not suited in drilling of deep geothermal wells. Drill bits that experience more wear than PDC, but less than conventional roller cone bits, might be a better alternative to reduce the costs involved in drilling of deep geothermal wells.

Several test methods to predict wear on drill bits were tested in the project, to see if the results were similar to the experienced wear during drilling. The tests that were carried out were originally developed for tunneling and included X-Ray Diffraction (XRD), Differential Thermal Analysis (DTA), Abrasion Value (AV)-test and VHNR (Vickers Hardness Number of Rock). The tests showed low correlation with the experienced wear on the drill bits. The low correlation might be a result of factors the tests did not concern. These factors include mineral composition, water saturation, grain size and rock formation. The election of material for testing might be a source of error as well. To decide whether the tests are useful in drilling of deep geothermal wells in the future, further testing in other wells is required.

INNHOLDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG	i
ABSTRACT	iii
INNHOLDSFORTEGNELSE	v
FIGURLISTE	vii
TABELLISTE	ix
FORKORTELSER	xi
FORORD	xiii
1 INNLEDNING	1
2 TEORI	3
2.1 Grunnvarme til oppvarming av bygninger	3
2.1.1 Lukkede systemer	4
2.1.2 Varmepumpens virkemåte	6
2.1.3 Energilagring.....	8
2.2 Prosjekt- og områdebeskrivelse	9
2.2.1 Geologien i Asker	11
2.2.2 Koaksial (rør-i-rør)-kollektor	13
2.3 Boreteknologi	15
2.3.1 Hammerboring.....	15
2.3.2 Rotasjonsboring.....	18
2.4 Støping av borehull med betongtrommel	22
2.5 Laboratoriemetoder	22
2.5.1 Borbarhet.....	22
2.5.2 Røntgendiffraksjon (XRD)	23
2.5.3 VHNR	25
2.5.4 Abrasjonsverdi (AV).....	26
2.5.5 Differensialtermisk analyse (DTA).....	27
2.6 Energi fra dype boringer i Norge – viktige forhold og potensial	28
3 METODE	30
3.1 Innsamling av borekaks	30
3.2 Røntgendiffraksjon (XRD)	30
3.3 VHNR	32

3.4	Abrasjonsverdi (AV)	34
3.5	Differensialtermisk analyse (DTA).....	36
3.6	Feltarbeid i Asker.....	37
4	RESULTATER	38
4.1	Røntgendiffraksjon (XRD)	38
4.2	VHNR.....	41
4.3	Abrasjonsverdi (AV)	42
4.4	Differensialtermisk analyse (DTA).....	43
4.5	Feltarbeid i Asker.....	45
5	DISKUSJON	47
5.1	Abrasjonsverdi (AV)	47
5.1.1	Sammenligning med verdier fra AV-testing i Oslofeltet.....	48
5.2	Differensialtermisk analyse (DTA).....	49
5.3	VHNR.....	49
5.4	Virkelig slitasje	50
5.5	Sammenligning abrasjonsverdi, VHNR og virkelig slitasje.....	51
5.5.1	Mulige feilkilder og årsaker	51
5.5.2	Testmetodenes begrensninger	53
5.6	PDC-borekrone	54
6	KONKLUSJON	56
6.1	Dype brønner.....	56
6.2	Laboratorietester.....	56
7	VIDERE ARBEID	58
8	REFERANSER	59
VEDLEGG	62
A	Geologisk kart over Asker.....	62
B	Prøvetakingsplan borekaks	63
C	Diffraktogram	64
C1	Brønn øst.....	64
C2	Brønn vest.....	104

FIGURLISTE

Figur 1: Lukket system for grunnvarme ved bruk av U-rørskollektor i fjell	6
Figur 2: Varmepumpens komponenter i et grunnvarmesystem som lukket system i fjell.....	7
Figur 3: Prinsipp for energilagring ved lukket system i fjell	8
Figur 4: Oversiktsbilde over brønnene ved Føyka	9
Figur 5: Plassering og navngivning av brønnene ved Føyka.	10
Figur 6: Temperaturmålinger i borehull ble gjort ved Arnestad skole sør i Asker	11
Figur 7: Borehullsmålinger ved Arnestad skole.....	12
Figur 8: Geologisk kart Asker	13
Figur 9: Tverrsnitt av borehullet med koaksialkolektor installert.....	14
Figur 10: Borekrone med integrerte wolframkarbidbiter tilhørende Båsum Boring AS.	16
Figur 11: Borekrone brukt av Båsum Boring AS ved boring av grunnvarmebrønner ved Føyka.	18
Figur 12: Rullemeiselborekrone med mange små tagger.....	20
Figur 13: PDC-borekrone tilhørende Båsum Boring AS	21
Figur 14: Refleksjon av røntgenstråle mot en krystallflate	23
Figur 15: Diffraktogram for en av prøvene det ble utført XRD-analyse av.....	24
Figur 16: Diagram som bestemmer om slitasjen på borekrona er lav eller høy.....	25
Figur 17: Apparat for testing av abrasjonsverdi med wolframkarbid som kuttermateriale	26
Figur 18: Veiting av wolframkarbidprøve for bestemmelse av abrasjonsverdi.	27
Figur 19: Prepareringsmetode for kaksprøver som ble brukt til XRD-analyse.....	31
Figur 20: Preparering av prøve til XRD-analyse.	32
Figur 21: Prepareringsmetode for kaksprøver som ble brukt i AV-test.	35
Figur 22: Kategorisering av slitasje basert på abrasjonsverdi i mg for wolframkarbid	36
Figur 23: Kategorisering av slitasje basert på abrasjonsverdi i mg for stål	36
Figur 24: Kvartsinnhold i prøvene fra brønn vest, oppgitt i %.	38
Figur 25: Kvartsinnhold i prøvene fra brønn øst, oppgitt i %.	40
Figur 26: Reaksjonsplott fra DTA for prøve Ø321.	44
Figur 27: Reaksjonsplott fra DTA for prøve Ø161	45
Figur 28: VHNR ligger mellom 400-700 for alle prøvene fra brønn vest og brønn øst, med unntak av sandseksjonen fra 700-800 meter i brønn øst	50

TABELLISTE

Tabell 1: Hardhetstallet (VHN) for ulike mineraler	33
Tabell 2: Mineralinnhold i prosent til prøvene fra brønn vest	38
Tabell 3: Mineralinnhold i prosent til prøvene fra brønn øst	39
Tabell 4: VHNR for prøvene fra brønn vest og slitasjekategorien verdiene tilsvarer.....	41
Tabell 5: VHNR for prøvene fra brønn øst og slitasjekategorien verdiene tilsvarer.	42
Tabell 6: Abrasjonsverdi for stålkutter (AVS) og wolframkarbidkutter (AV) for prøven fra brønn øst på 321 meters dyp (Ø321).....	43
Tabell 7: Slitasje på borekronene som ble brukt i boreprosjektet ved Føyka.	46
Tabell 8: Verdier for AV og AVS ved testing i Oslofeltet.....	48

FORKORTELSER

AV	Abrasion Value
BWI	Bit Wear Index
CLI	Cutter Life Index
CMR	Christian Michelsen Research
DRI	Drilling Rate Index
DTA	Differential Thermal Analysis
DTS	Distributed Temperature Sensing
IPT	Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse
NTNU	Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet
ORMEL	Optimal resussursutnyttelse av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus og Elverum
PDC	Polycrystalline Diamond Compact
RPM	Rotations Per Minute
VHNR	Vickers Hardness Number of Rock
WoB	Weight on Bit
XRD	X-Ray Diffraction

FORORD

Bakgrunnen for denne oppgaven er et pilotprosjekt som innebærer boring av to dype brønner til 800 meter ved Føyka i Asker. Prosjektet er et samarbeid mellom Asker kommune, Båsum Boring AS og Asplan Viak AS. I tillegg har Innovasjon Norge og Enova bidratt med støtte til prosjektet. Hovedmålet for oppgaven har vært å prøve ut testmetoder for bestemmelse av slitasje på borekroner og se på resultater fra uttesting av ny boreteknologi. Oppgaveteksten er formulert av Randi Kalskin Ramstad, førsteamanuensis II ved NTNU og konsulent i Asplan Viak AS, som også har vært hovedveileder for oppgaven. Medveileder har vært Bjørge Brattli, professor ved NTNU.

Jeg ønsker å rette en stor takk til mine veiledere for oppfølgingen jeg har fått gjennom hele året. Videre vil jeg takke Gunnar Vistnes fra ingeniørgeologisk laboratorium og Laurentius Tjihuis fra kjemisk mineralogisk laboratorium ved institutt for geologi og bergteknikk på NTNU for all hjelp jeg har fått med laboratoriearbeidet. Jeg ønsker også å takke Båsum Boring AS og Båsum Boring Trøndelag AS for velvillig deling av nyttig informasjon i forbindelse med oppgaven. Filip Dahl ved Sintef og Amund Bruland ved institutt for bygg, anlegg og transport rettes også stor takk for nyttige faglige diskusjoner. Ingeniørgeologisk laboratorium ved institutt for geologi og bergteknikk, representert ved Filip Dahl, har også bidratt med data til oppgaven.

Til slutt vil jeg takke 2016-kullet fra Petroleumsfag og Tekniske Geofag for 5 fantastiske år på NTNU.

Trondheim, 10.06.2016

Mette Nordmark Bones

1 INNLEDNING

Dype brønner til grunnvarmeutnyttelse har mange fordeler. Ressursen er tilgjengelig overalt og den er uavhengig av sol, vind eller regn. Et grunnvarmesystem har i tillegg lite utslipp til luften, vannet eller grunnen. Det kreves også lite areal med dype brønner, og systemene gjør ikke store inngrep i naturen (Evensen, et al., 2011).

Like ved Føyka stadion i Asker er det planlagt (og delvis gjennomført) et pilotprosjekt som innebærer boring av to dype brønner til 800 meters dybde. Brønnene skal benyttes i et grunnvarmesystem. Pilotprosjektet er en del av et større prosjekt som ser på mulighetene for å benytte grunnvarme til oppvarming av en større andel nye bygninger i Asker sentrum. Brønnene ved Føyka vil bli de dypeste anvendte grunnvarmebrønnene i Norge noensinne og det var derfor planlagt å bore to dype brønner først, for å se hvor stor kapasitet systemet kan gi. Teknologi og metoder som ble brukt for å etablere brønnene ved Føyka vil bli presentert i denne oppgaven.

Prosjektet ved Føyka er et samarbeidsprosjekt mellom Asker kommune, Båsum Boring AS og Asplan Viak AS. I tillegg har prosjektet mottatt støtte fra Enova og Innovasjon Norge. Selve boringen ble utført av Båsum Boring AS og det ble i forbindelse med prosjektet testet ut nyere boreteknologi. Boring av dype brønner er et nytt område innen grunnvarme i Norge, og det er ofte forbundet med høye kostnader. Et av problemene med dype brønner er at de kan innebære høy slitasje på borekrona som benyttes. Båsum Boring AS har derfor gått til innkjøp av en ny og mer slitesterk type borekrone som er mye brukt i oljeindustrien, kalt PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*). PDC er mer slitesterk fordi den er montert med diamantbiter/ diamantstøv på kutteelementet. Denne ble testet ut i brønnene ved Føyka for å se om den er økonomisk lønnsommere, sammenlignet med konvensjonelt utstyr som består av rullemeiselborekroner laget av wolframkarbid og stål. Resultater fra uttesting av ny boreteknologi vil bli presentert i denne oppgaven.

Ved boring til tunnelformål benyttes i dag en rekke tester for å bestemme forventet slitasje på boreutstyret. Materialet i borekroner benyttet til disse formålene er ofte likt som materialet i kronen brukt til boring av grunnvarmebrønner. Det var derfor et ønske om å undersøke hvorvidt boretestene kunne være nyttige i grunnvarmeprosjekter. Prøver av borekaks ble tatt ut av brønnene ved Føyka for hver 20. meter som ble boret. Prøvene ble testet med

røntgendiffraksjonsanalyse (XRD), testing av abrasjonsverdi (AV), beregning av VHNR (*Vickers Hardness Number of Rock*) og differensialtermisk analyse (DTA) for å bestemme hvor stor slitasje bergmassen i området ville påføre borekrona. Testene er beskrevet nærmere i kapittel 2.3. Resultatene ble sammenlignet med den reelle slitasjen på boreutstyret som ble benyttet, for å se om testene korrelerte med virkeligheten.

Som bakgrunns litteratur for testene og teknologien som har blitt utprøvd, gis en innføring i grunnvarmesystemer basert på borede brønner. Hovedfokus blir lagt på systemer med lukket kollektorslange i fjell, som i systemet ved Føyka. Her vil også konvensjonell boreteknologi benyttet til grunnvarmeformål presenteres. Videre vil det også bli presentert mulige viktige forhold og forbedringspotensial for dype grunnvarmebrønner.

2 TEORI

I denne delen vil det bli gitt en innføring i grunnvarmesystemer basert på borede brønner. Mest fokus vil bli lagt på det systemet som benyttes i brønnene ved Føyka, det vil si grunnvarme som lukket system i fjell. Boreprosjektet på Føyka i Asker vil bli presentert, med boreteknologi for boring av de to forsøksbrønnene.

Relevant teori for laboratorieundersøkelser av borekaks vil også bli beskrevet. Røntgendiffraksjonsanalyse (XRD), testing av abrasjonsverdi (AV), beregning av VHNR (*Vickers Hardness Number of Rock*) og differensialtermisk analyse (DTA) vil bli nærmere beskrevet, samt formålet med disse testene.

2.1 Grunnvarme til oppvarming av bygninger

Temperaturen nede i jorda har mindre variasjon enn temperaturen på overflaten. Dette har stor betydning i områder med så store temperaturforskjeller som i Norge. Mens temperaturen kan variere fra mer enn $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ om vinteren til over $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ om sommeren på overflaten, vil temperaturen i grunnvannet ha en middeltemperatur på $3\text{-}7\text{ }^{\circ}\text{C}$, med minimumstemperatur ned mot $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ og maksimum opp mot $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Pedersen et al, 2003). Temperaturen i grunnvannet er derfor høyere enn temperaturen på overflaten om vinteren og motsatt om sommeren, noe som gir gode forutsetninger i forhold til behovet for oppvarming og nedkjøling ved bruk av grunnvarme.

Grunnvarme er kort sagt lagring av omgivelsesenergi i jord, berggrunn eller grunnvann. Kilden til denne varmen er i stor grad solenergi, men et lite varmebidrag kommer også fra radioaktiv nedbrytning av grunnstoffer i bakken (Ramstad, 2011). Geotermisk gradient er økning i temperatur med dybde nedover i jorden, og denne varierer i ulike områder i berggrunnen. Typiske verdier for den geotermiske gradienten ligger mellom $1,5\text{ - }2,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (Banks, 2012). Temperaturøkningen nedover i jorda gjør at det strømmer en varmefluks fra jorda mot overflaten. Varmefluksen i et område bestemmes av den geotermiske gradienten og varmeledningsevnen til bergmassen i området.

For at grunnvarme skal kunne tas i bruk, må varmen i et område kunne transporteres. Denne varmeoverføringen skjer ved varmeledning, konveksjon eller stråling. Varmeledning er i stor

grad avhengig av kvartsinnholdet i et materiale, fordi kvarts er det mineralet som har høyest varmeledningsevne.

Varmeledning mellom to substanser oppstår ved overføring av kinetisk energi fra molekyler eller atomer i den varmeste substansen til molekyler eller atomer i den kaldeste substansen. Overføringen av energi skjer ved bevegelse av valenselektronene (elektroner i det ytterste skallet) i et atom og kan finne sted i både fluider og fast stoff. Nede i jorda vil denne varmeledningen i hovedsak skje mellom bergarter sammensatt av mineraler med få ledningselektroner. En annen type varmeledning er derfor den viktigste årsaken til varmeledning mellom bergarter. Denne varmeledningen oppstår på grunn av vibrasjoner i bergartene (Gupta & Roy, 2007).

Konveksjon innebærer varmetransport som oppstår på grunn av fluider i bevegelse. I grunnvarmesammenheng er denne varmetransporten ofte knyttet til grunnvannets bevegelse. Alle legemer sender ut energi i form av elektromagnetisk stråling. Desto varmere et legeme er, desto mer varmestråling vil det sende ut. Stråling fra solen og absorpsjon av denne er derfor viktige varmeoverføringsmekanismer på jorden (Banks, 2012).

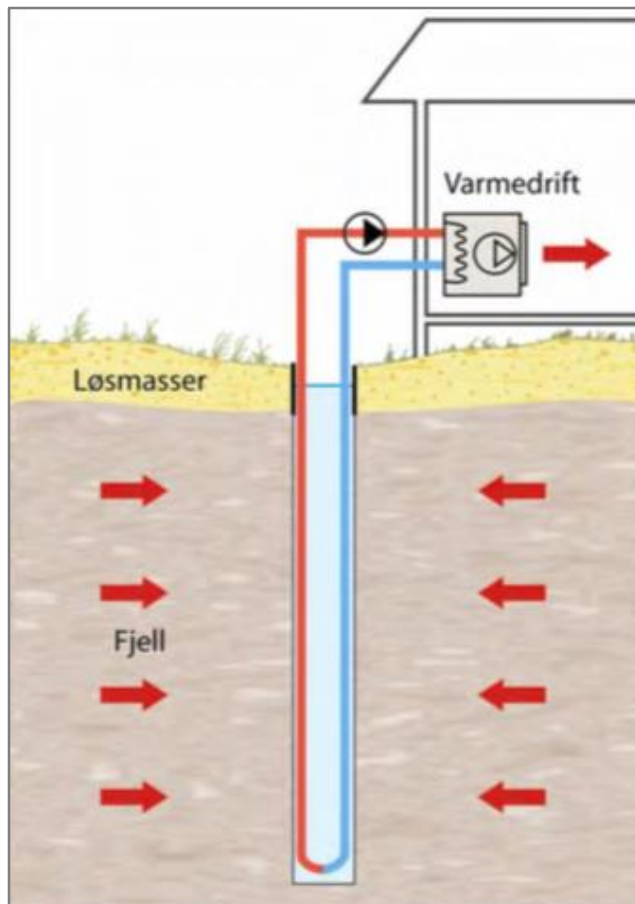
Grunnvarmesystemer etableres enten som åpne eller lukkede systemer. I åpne grunnvarmesystemer tas grunnvannet ut av bakken og varme hentes fra vannet enten direkte eller ved bruk av en varmepumpe. Grunnvarmesystemer som lukket system i fjell innebærer bruk av en kollektorslange som henter varme fra grunnen. Grunnvarme ved bruk av lukket system i fjell vil bli beskrevet nærmere, da det er et slikt system som er planlagt i de borede brønnene ved Føyka.

2.1.1 Lukkede systemer

Det finnes en mulighet for å etablere grunnvarmesystemer uten å fysisk måtte ta ut grunnvann. Denne muligheten innebærer å danne et lukket system, som henter varme fra grunnen med bruk av en kollektorslange. Kollektorslangen vil fungere som en varmeveksler nede i hullet, ved at frostvæske sirkuleres ned i den og henter varme fra omgivelsene (Banks, 2012). Lukkede systemer kan etableres i både løsmasser og fjell. Lukkede systemer i fjell er de vanligste i Norge i dag, og det vil derfor bli lagt mest fokus på denne typen.

I et lukket system blir et fluid sirkulert ned i bakken fra en varmepumpe (kapittel 2.1.2) og opp til overflaten igjen gjennom en kollektorslange. Denne kollektorslangen danner en kontakt mellom grunnen og fluidet og gjør derfor at fluidet kan hente varme fra grunnen. Dette skjer enten ved at kollektorslangen er installert i et borehull eller plassert nede i jorda (jordvarme). En vanlig kollektor som brukes mye i grunnvarmesammenheng har en U-form og kalles *U-rørskollektor* (figur 1). I en U-rørskollektor sendes kollektorvæsken ned i brønnen gjennom den ene siden av U'en og opp igjen til overflaten på den andre siden. Varmen som hentes ut tas med tilbake til varmepumpen og tilføres der, før fluidet kjøles ned for å gjøres klart til en ny sirkulasjon (Banks, 2012).

I harde akviferer i fjell, som granitt-, kalkstein- eller krittformasjoner, er det ikke nødvendig å installere fôringsrør i hele brønnen. Det kan i disse formasjonene være tilstrekkelig med en kort lengde fôringsrør helt i toppen av brønnen, en tommelfingerregel som brukes av Båsum Boring Trøndelag AS er 2 meter rør ned i fjellet. En brønn boret under slike betingelser blir kalt «åpent hull». Fôringsrør benyttes selv om formasjonen er hard, fordi de gir støtte til eventuelle løsmasser som ligger oppå fjellet (Banks, 2012).



Figur 1: Lukket system for grunnvarme ved bruk av U-rørskollektor i fjell. Føringør i løsmassene vises ved tykkere svart strek (NGU, 2015).

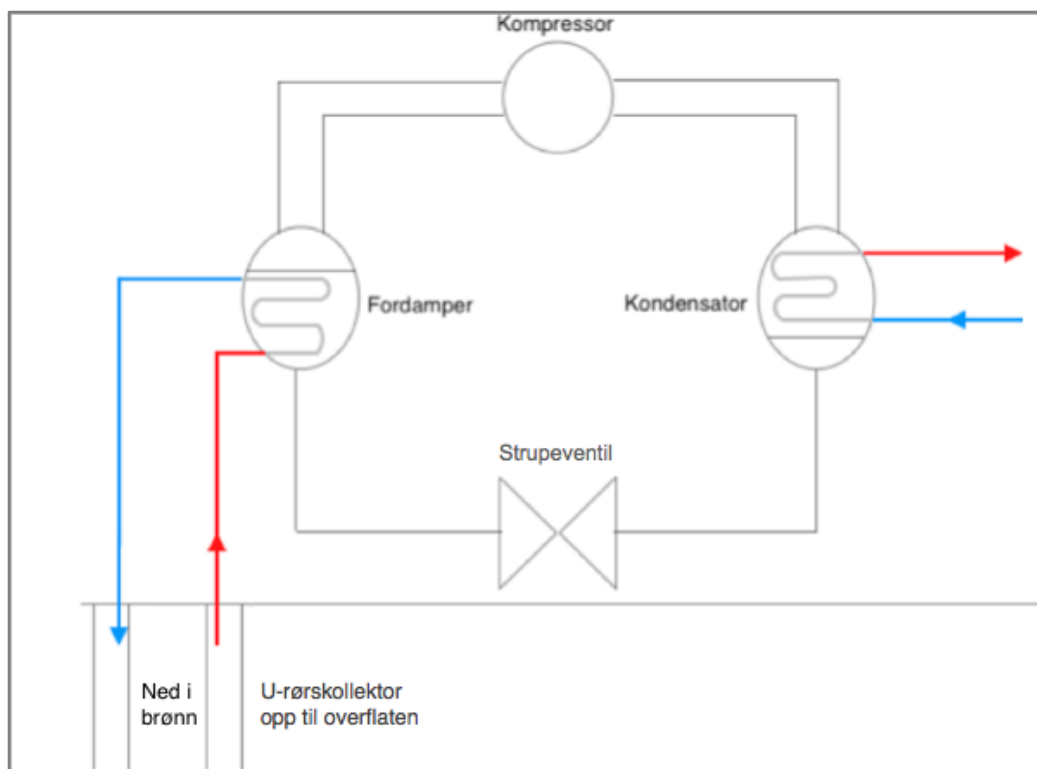
2.1.2 Varmepumpens virkemåte

For å utnytte varmen fra langt nede i grunnen er det nødvendig å bruke en varmepumpe. En varmepumpe trenger tilførsel av energi for å produsere energi. Vanligvis tilføres denne energien i form av elektrisitet. Varmen som varmepumpen avgir blir tilnærmet lik summen av varmemengden som tas ut av grunnvannet eller berggrunnen og den tilførte elektriske energien. Vanligvis er dette forholdet slik at en tredel av varmen kommer fra varmepumpen og to tredeler fra grunnvarmekilden (Stene, 2000).

En varmepumpe er bygget som et lukket kretsløp og består av en fordampner, en kompressor, en kondensator og en strupeventil, som vist i figur 2. Varme overføres i en varmepumpe ved bruk av et arbeidsmedium som går gjennom disse fire komponentene (Stene, 2000).

Arbeidsmediumet er i væskeform ved inngangen til fordamperen, og trykket vil være så lavt at væsken har lavere temperatur enn varmekilden. Dette gjør at varme vil strømme fra varmekilden til væsken, som da vil begynne å koke. Når væsken har fordampet og gått over i gassfase strømmer gassen over til en kompressor. Her vil den komprimeres slik at den får et høyere trykk, som igjen fører til økt temperatur (Stene, 2000).

Gassen vil deretter strømme videre til kondensatoren. Her vil varme overføres fra gassen til et medie, enten vann eller luft, som skal varmes opp for å sirkuleres gjennom en bygning. Samtidig som arbeidsmediet avgir varme vil det kondensere og gå over i væskefase. Væsken som arbeidsmediet nå består av har fortsatt høyt trykk og høy temperatur og sendes derfor gjennom en strupeventil som minker trykket og temperaturen. Væsken strømmer så tilbake til fordamperen og kretsløpet starter på nytt (Stene, 2000).



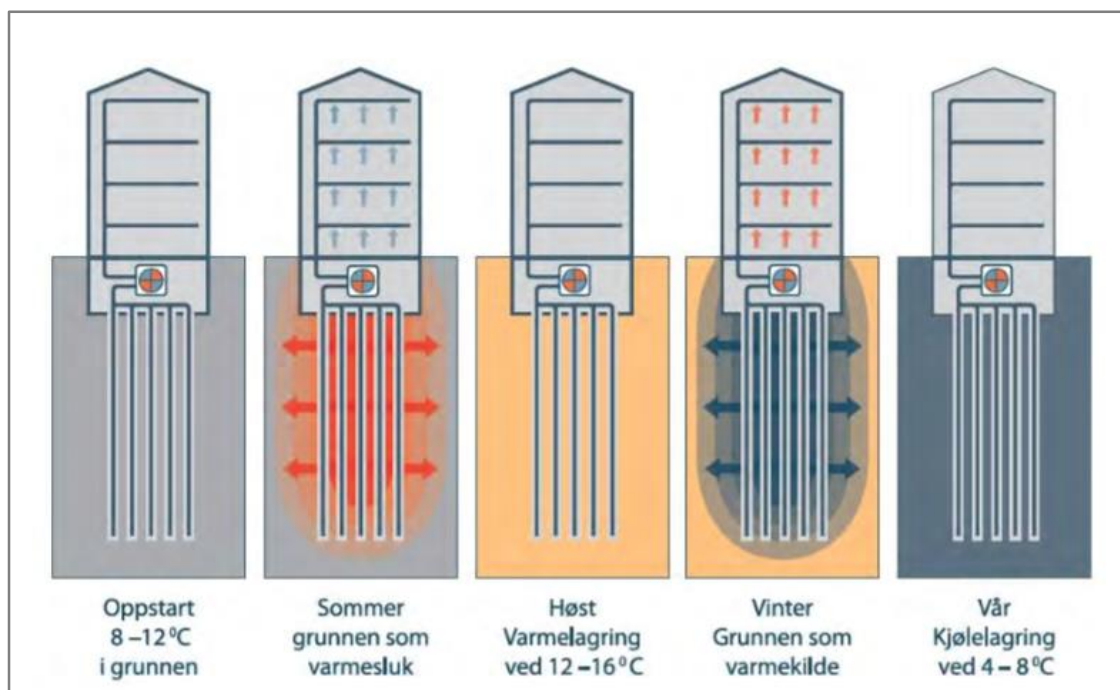
Figur 2: Varmepumpens komponenter i et grunnvarmesystem som lukket system i fjell (Modifisert etter (Stene, 2000)).

2.1.3 Energilagring

I områder hvor oppvarmings- eller kjølebehovet er så stort at det blir vanskelig å oppnå ønsket kapasitet med én brønn kan det lønne seg å etablere et grunnvarmesystem som består av flere brønner. Brønner som bores i samme område vil ha påvirkning på hverandre, typisk ved at kapasiteten til en individuell brønn blir noe lavere (Banks, 2012).

For å få full utnyttelse av de stabile temperaturene i grunnvannet eller berget kan det være lønnsomt å etablere et grunnvarmesystem som kan både ta opp og sende tilbake varme. De fleste varmepumper er utformet med muligheter for å snus, slik at de i stedet for å ta opp varme fra bakken sender varme fra bygningen ned i bakken (Banks, 2012). Dette gjør at grunnen blir et slags batteri eller en lagringstank, hvor varme lagres om sommeren for så å tas ut igjen om vinteren.

Et energilager ved bruk av lukket system i fjell består av flere borehull plassert tett inntil hverandre (figur 3). Om sommeren kan disse brønnene avgi varme til formasjonen, som lagres gjennom høsten og tas ut om vinteren (Ramstad, 2011).



Figur 3: Prinsipp for energilagring ved lukket system i fjell (Illustrasjon: Kim Brantenberg, referert i (Ramstad, 2011)).

Fordelen med et balansert energilager er at avstanden mellom brønnene kan være mindre. Dette gjør at slike løsninger er mindre arealkrevende (Pedersen et al, 2014). I Norge har vi derimot større behov for oppvarming enn nedkjøling i løpet av et år. Det vil si at i et grunnvarmesystem vil det tas ut mer varme enn det tilføres. Dette gjør at temperaturen i grunnen vil avta med tid og behovet for effekt fra varmepumpene øker med tiden (Banks, 2012).

2.2 Prosjekt- og områdebeskrivelse

Pilotprosjektet som er planlagt på Føyka i Asker (figur 4) går ut på å bore to dype brønner ned til 800 meters dybde. Dette ble gjort for å finne ut om de dype brønnene gir den effekten som er ønsket ved bruk i et grunnvarmesystem. Hvis prosjektet går som planlagt vil det deretter bores flere dype brønner til varmeuttak og et balansert energilager med mange konvensjonelle brønner (200-300 meter dype). Grunnvarmesystemet er planlagt som et lukket system i fjell, men utformingen av kollektoren er noe annerledes enn de konvensjonelle U-rørskollektorene. Mer teori om kollektoren som brukes blir utdypet i kapittel 2.2.2.



Figur 4: Oversiktsbilde over brønnene ved Føyka. Rød markør viser omtrentlig lokasjon.

Figur 5 viser plasseringen av de to brønnene ved Føyka, navngitt som brønn vest og brønn øst i denne oppgaven.



Figur 5: Plassering og navngivning av brønnene ved Føyka.

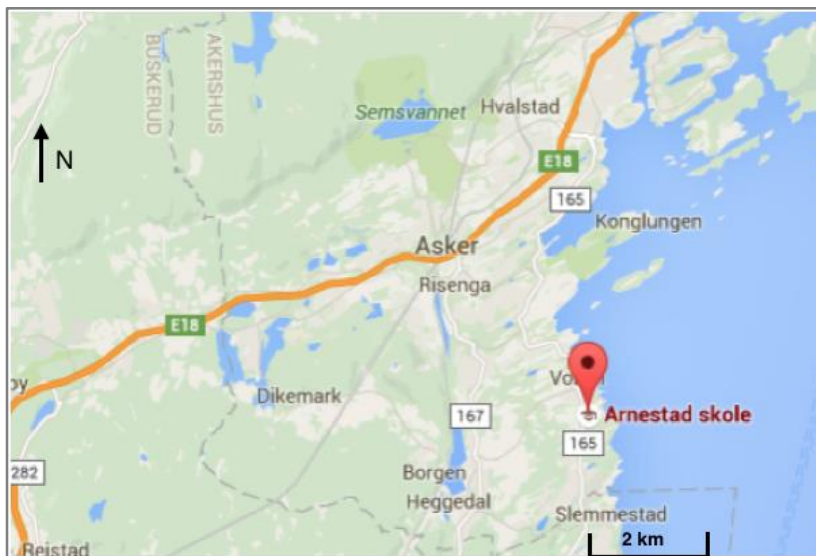
Dypere brønner er vanskeligere å bore enn de konvensjonelle energibrønnene, som typisk er 200-300 meter dype. Det har heller ikke vært boret dype brønner i stor grad i Norge tidligere, og få av borefirmaene på markedet har testet ut teknologi til dette formålet. Boring av to brønner til 800 meter vil være de dypeste anvendt til grunnvarmeuttak i Norge noensinne. Ras i formasjonen under boring, eller før kollektoren er installert i hullet, og boring gjennom store vannførende sprekker var problemer som kunne oppstå underveis i boringen. Boring gjennom vannførende sprekker kan senke borehastigheten betraktelig, mens ras i formasjonen kan føre til at brønnen tettes igjen helt eller utstyr blir ødelagt.

Ved grunnvarmesystemer generelt er ofte brønnboring svært kostbart. En av hovedgrunnene til de dyre kostnadene er utstyret som benyttes. Den delen av utstyret som kanskje koster mest er borekrona, fordi denne stadig må skiftes ut på grunn av slitasje. En ny type borekrone ble derfor testet i forbindelse med pilotprosjektet ved Føyka, for å se om det lønner seg med mer slitesterke borekroner. Mer om denne blir presentert i kapittel 2.2.3.

2.2.1 Geologien i Asker

Geologien i et område har betydning for hvor gunstig det er å utnytte grunnvarme til oppvarming. Hvor mye varme brønnen kan produsere er avhengig av berggrunnens varmeledningsevne, temperatur og geotermiske gradient. Disse faktorene vil også ha betydning for hvor dyp en brønn bør være i forhold til ønsket kapasitet. I tillegg til dette har geologien i området også noe å si for kostnadene i forbindelse med boring av grunnvarmebrønner. Noen bergartstyper og mineraler er ekstra motstandsdyktige mot boring og vil føre til mye slitasje på utstyr. I enkelte tilfeller kan harde bergarter også føre til at det er umulig å komme ned til ønsket dybde.

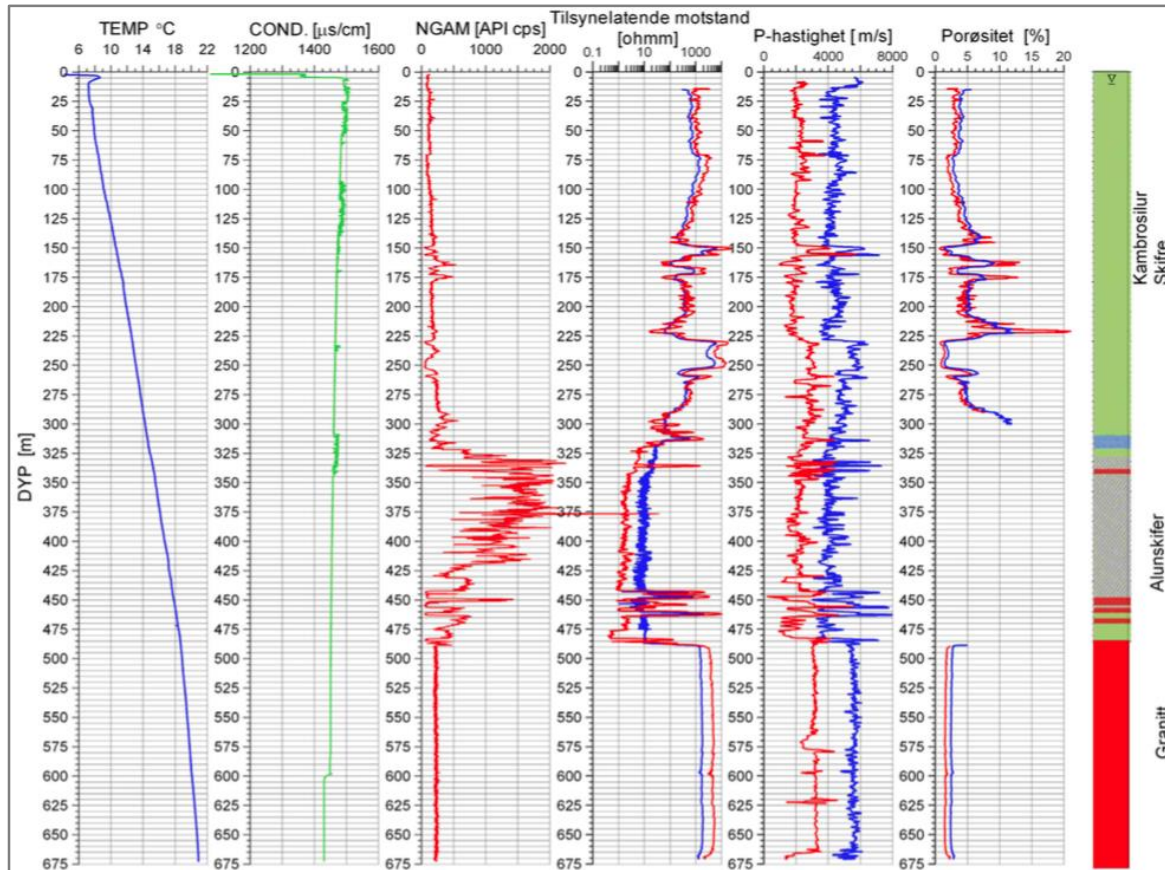
Temperaturen målt 500 meter ned i grunnen sør i Asker er høyere enn gjennomsnittlig temperatur ved dette dypet i Norge. Dette ble undersøkt ved temperaturmåling i brønner boret ved Arnestad skole (figur 6) (Elvebakk, 2011).



Figur 6: Temperaturmålinger i borehull ble gjort ved Arnestad skole sør i Asker. Rød markør viser hvor Arnestad skole ligger på kartet.

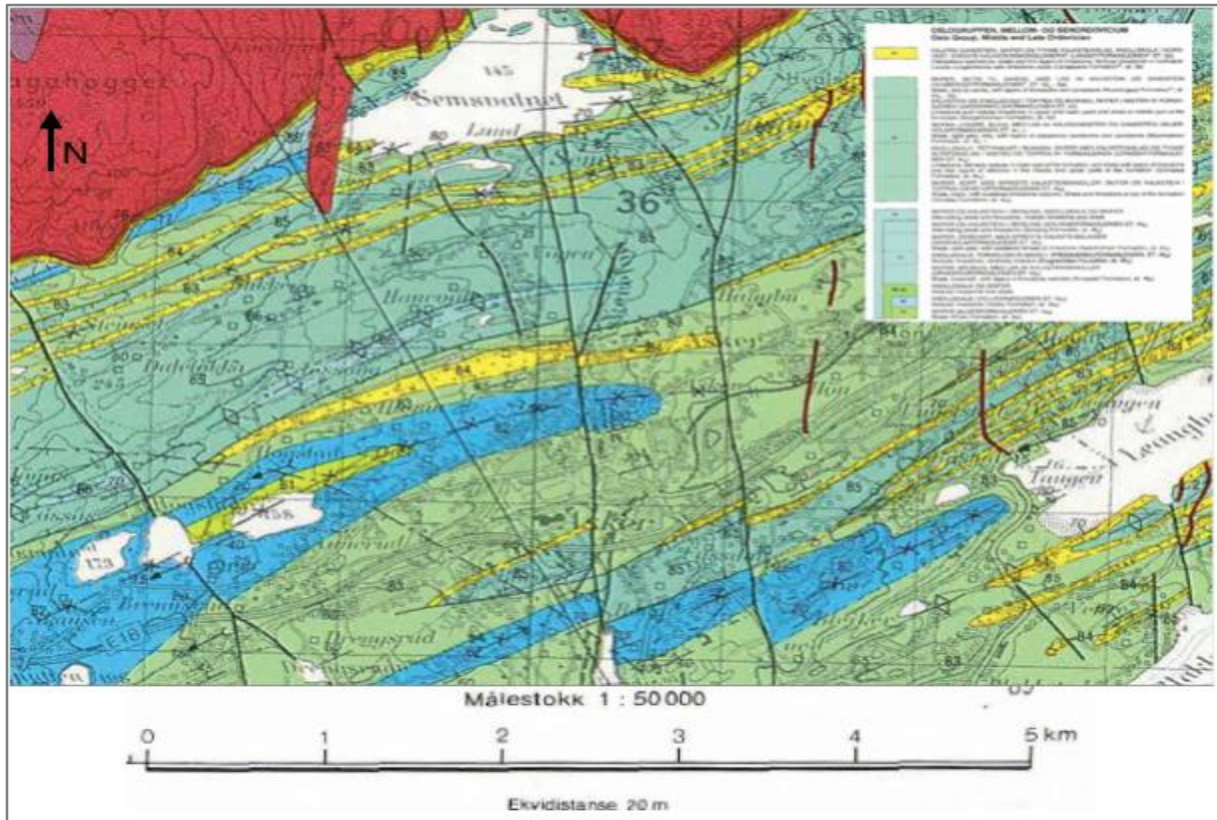
Varmestrøm målt i dette området er også høyere enn gjennomsnittsverdien, noe som gjør at den geotermiske gradienten blir høy. Varmestrøm er energibidraget i grunnen som kommer av spalting av radioaktive elementer i jordskorpa og mantelen. Den høye varmemstrømmen sør i Asker er derfor trolig et resultat av et 100 meter tykt lag med alunskifer (figur 7) (Elvebakk, 2011).

Føyka stadion ligger nord i Asker og derfor ikke midt i området hvor disse målingene ble gjort. Det er likevel en mulighet for at det finnes små lag av alunskifer i området rundt Føyka, noe som kan gi en høyere temperatur i bakken enn det som er normalt på landsbasis.



Figur 7: Borehullsmålinger ved Arnestad skole. Temperatur, ledningsevne i vann, naturlig gamma, resistivitet, P- og S-bølgehastighet, porøsitet og geologi vises mot dybde (Elvebakk, 2011).

Utklipp av geologisk kart over Asker (figur 8) viser at det skal være mye sedimentære bergarter med kalkstein og leirskifer i området rundt Føyka. Sedimentære bergarter er bergarter som er dannet ved diagenese og ikke har blitt omdannet på andre måter. Diagenese er den prosessen der løse sedimenter går over til faste bergarter (Bryhni, 2009). Fullstendig kart over Asker med tegnforklaringer vises i vedlegg A.



Figur 8: Geologisk kart Asker. Utklipp fra (Bockelie, et al., 1990)

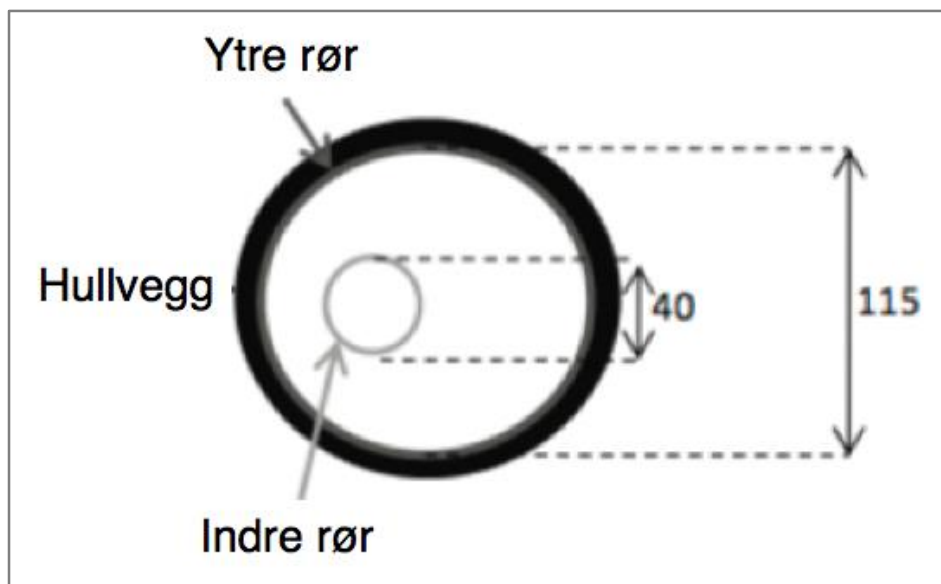
Ved boring til 800 meters dyp i området ved Føyka var det stor sannsynlighet for at det ville bli boret mye gjennom kalkstein og leirskifer. Knollekalk skal det også finnes mye av i området, en bergart som består av tettpakkede lyse knoller av kalkstein i en mørkere skifer. Den kan også finnes med små, sjeldnere knoller av kalkstein, men da er betegnelsen knolleskifer (Bryhni, 2015). Det var også, som nevnt, antatt at Alunskifer kunne bli oppdaget underveis i boringen.

2.2.2 Koaksial (rør-i-rør)-kollektor

Vanlige kollektorslanger som brukes for borehull ned til 200-300 meter er ikke hensiktsmessige å benytte ved boring av dypere brønner, da disse ikke gir god nok termisk kontakt med fjellet og innebærer for høyt trykktap. For å maksimere varmeuttaket må det derfor utvikles en koaksialkollektor som er tilpasset forholdene i dypere borehull. Systemet som skal benyttes er et rør-i-rør-system (koaksial) som fungerer ved at kollektorvæske pumpes ned i bunnen av hullet gjennom det ytre røret for så å strømme tilbake i toppen gjennom det indre røret. Kollektoren er utformet slik at den er enkel å installere, gir

muligheter for å bruke vann som kollektorvæske og har minimalt varmetap, trykktap og energitap.

Prosedyren for å installere en koaksialkollektor (figur 9) i et borehull innebærer å først installere en tynn plastslange på innsiden av borehullsveggen. Denne slangen har en diameter som er 1 mm mindre enn diameteren til hullveggen og blir sendt ned i hullet ved hjelp av et lodd i bunnen. Når plastslangen er installert blir hullet fylt med vann og det dannes en forsegling mot berget og vannet på utsiden av borehullet. Plastslangen utgjør dermed det ytre røret i kollektoren. Etter plastslangen er fylt med vann, installeres det indre røret (senterrøret) i kollektoren. Dette røret er ofte et polyetylenrør, i samme materiale som konvensjonelle U-rør. Installasjon av senterrøret gjøres også med et lodd festet i bunnen som senkes nedover til ønsket dybde (Acuña, 2010).



Figur 9: Tverrsnitt av borehullet med koaksialkollektor installert. Sett ovenfra. Modifisert etter (Acuña, 2013).

I en koaksialkollektor vil det som oftest benyttes vann (ikke frostvæske) som kollektorvæske og det må derfor sørges for at systemet til enhver tid er frostfritt. Vannet vil som nevnt strømme inn mellom plastslangen og utsiden av senterrøret og opp gjennom innsiden av senterrøret. På denne måten samler vannet varme fra berggrunnen rundt hullet på veien ned, som den frakter til overflaten på innsiden av senterrøret på vei opp (Acuña, 2010).

Installasjon av kollektoren i dype brønner kan innebære komplikasjoner hvis det går ras i formasjonen. Dette må tas hensyn til ved å støpe utsatte soner før kollektoren skal installeres. Støping av borehull med betongtrommel er nærmere beskrevet i kapittel 2.4.

2.3 Boreteknologi

Prosjektet i Asker innebærer, som tidligere beskrevet, boring av to forsøksbrønner ned til 800 meters dyp. Båsum Boring AS utførte boringene og det ble gjort ved hammerboring drevet av trykkluft med høyt trykk i den ene brønnen og rotasjonsboring med stor rigg i den andre brønnen.

2.3.1 Hammerboring

Brønn øst (figur 5) ble boret ved bruk av hammerboringsteknologi. Hammerboring er en boremetode som ofte benyttes i både løsmasser og harde, krystalline bergarter med et tynt lag løsmasser på toppen. Fordelen med hammerboring er at det går hurtig å bore hull i harde formasjoner, sammenlignet med andre boremetoder (Misstear et al, 2006). Utstyret for boremetoden består av en borekrone, ofte med integrerte wolframkarbidbiter, montert på en sakteroterende hammer (Banks, 2012). En slik borekrone er vist i figur 10. Hammeren med borekrona dyttes ned i formasjonen ved bruk av trykkluft eller hydraulisk trykk fra vann. De trykkluftsdrevne boreriggene har dårligere virkningsgrad enn de hydrauliske, noe som betyr at de har høyere driftskostnader. Hydraulisk drevne borerigger kan også bore dypere. De har likevel en høyere innkjøpspris og er dyrere å vedlikeholde (Rosén et al, 2001).



Figur 10: Borekrone med integrerte wolframkarbidbiter tilhørende Båsum Boring AS.

Typiske hastigheter for hammeren er 1000-2000 slag i minuttet. Samtidig som hammeren slår ned i bakken roteres borerørene med en rotasjonshastighet på 20-40 rotasjoner per minutt (Rosén et al, 2001). Det finnes to typer hammerboring, topphammerboring og senkhammerboring.

Alle typer boring forutsetter at borekaks tas ut av hullet underveis i boringen. Dette kan ved hammerboring gjøres med bruk av luft, vann eller slam som borefluid. Borekaksen transporteres med fluidet ut av hullet gjennom *ringrommet* (mellomrom mellom borestreng og brønnvegg). Brukes det boreslam har dette fluidet en ekstra effekt, fordi det smører borehullsveggen. Boreslam brukes likevel stort sett bare ved boring i løsmasser og jord, og kan bare benyttes ved topphammerboring.

Ved topphammerboring er slagverket til hammeren plassert øverst i riggen, og slagkraften overføres ned til borekrona via borerørene. Ved senkhammerboring er slagverket plassert i bunnen av borestrengen, ved borekrona. Slagverket vil dermed slå rett på krona, noe som gjør at store deler av energien overføres direkte til borekrona som slår ned i formasjonen.

Sammenlignet med topphammerboring vil ikke penetrasjonen minke i like stor grad med dypet for senkhammerboring, noe som gjør at avvik fra planlagt brønnbane blir mindre. Ulemper er likevel at penetrasjonsraten er initielt lav og at boremetoden har et høyt energiforbruk (Rosén et al, 2001).

Senkhammerboring med trykkluftdreven hammer er den vanligste metoden for boring av grunnvarmebrønner i dag. Vanlig trykk som brukes for å drive borestrengen nedover er rundt 2500 kPa, men det kan opereres med både lavere og høyere trykk enn dette (Sterrett, 2007). Problemet med å bruke luft er at det ikke er like lett å få borekaks ut av hullet, noe som særlig kan føre til problemer når det bores ned til grunnvannsspeilet.

Hydraulisk dreven senkhammerboring er en relativt ny metode som ble utviklet for å unngå problemer knyttet til boring i bergarter med høyt vanninnhold. Metoden ble utviklet av Wassara for å redusere energiforbruket og øke penetrasjonsraten, samtidig som den skulle forbedre arbeidsmiljøet ved at det ikke ble produsert like mye støv. Ulempen med metoden er at den krever mye vann, og at vannet som brukes bør være av veldig god kvalitet for ikke å ødelegge utstyr (Rosén et al, 2001).

Ved boringene i Asker ble det i brønn øst brukt senkhammerrigg og en booster med et trykk på 6000 kPa til å drive borekrona nedover. Borekrona som ble brukt var en svært mye brukt krone til dette formålet og vises i figur 11. Borekaks ble fjernet fra brønnen ved bruk av kun luft. For å unngå tretthetsbrudd ble borekronene byttet etter ca 200 meter, noe som er en vanlig prosedyre for Båsum Boring AS.



Figur 11: Borekrone brukt av Båsum Boring AS ved boring av grunnvarmebrønner ved Føyka.

2.3.2 Rotasjonsboring

Brønn vest (figur 5) ved Føyka ble boret ved rotasjonsboring. Rotasjonsboring er en boremetode som kun benytter rotasjon av borekrona og borestrengen til å drive strengen nedover i formasjonen.

Rotasjonsboring kan foregå ved direkte sirkulasjon eller revers sirkulasjon. Ved direkte sirkulasjon kan det brukes en toppdrevet rotasjonsrigg eller en kellyrigg. En kellyrigg er montert med en motor som skal sette systemet i gang, en pumpe for sirkulasjon av borefluidet, en vinsj for å løfte borestrengen opp og ned og en mast som borestrengen er festet i. På gulvet i riggen finnes også et rotasjonsbord som sørger for at strengen roterer. En borestreng av denne typen består av lengder med borerør, normalt 3 meter lange, vektrør og en borekrone. Den øverste lengden borerør er det som kalles Kelly, og denne er gjerne firkantet eller sekskantet istedenfor rund. Vektrør blir brukt for å gi nok vekt til å drive borestrengen nedover, samtidig som de stabiliserer strengen når den beveger seg ned i formasjonen. En toppdrevet rigg skiller seg fra en kellyrigg ved at rotasjonen påføres av en

hydraulisk motor montert øverst i masten, og ikke med bruk av rotasjonsbord og kelly (Misstear et al, 2006).

Ved direkte sirkulasjon blir borefluidet sendt ned borestrengen på innsiden av borerørene, før det går ut gjennom hull i borekrona og tar med seg borekaks opp gjennom ringrommet i brønnen. Borefluidet tas fra en stor tank som bør ha et volum på omtrent tre ganger volumet til hullet som skal bores (Misstear et al, 2006).

Ved borestart må det installeres et lederrør for å hindre erosjon av de øverste sedimentene fra borefluidet. Dette installeres uten å bruke borefluid. Når røret er installert kan boringen fortsette med bruk av borefluid. Når det er boret så langt som en lengde med borerør, blir et nytt borerør koblet på, før boringen fortsetter igjen. Denne prosessen gjentas til ønsket lengde er nådd (Misstear et al, 2006).

Borefluidet som brukes i rotasjonsboring med direkte sirkulasjon har, i tillegg til å fjerne borekaks ut av brønnen, som oppgave å kjøle og smøre borekrona og holde borekaks i løsningen ved bytte av borerør. Egenskapene til fluidet må derfor være tilpasset alle disse oppgavene, og dette gjøres ved å kontrollere viskositeten, tettheten, hastigheten og gelstyrken til fluidet (Misstear et al, 2006). I Norge er det vanlig å benytte kun vann som borefluid ved boring i krystalline bergarter på land, og da ses det bort fra noen av disse effektene. Når vann benyttes som borefluid er fluidets viktigste oppgaver å kjøle borekrona og frakte kaks ut av brønnen.

Rotasjonsboring med revers sirkulasjon skiller seg fra den direkte sirkulasjonsmetoden ved at borefluidet går motsatt vei i brønnen; altså ned i ringrommet og opp gjennom borestrengen. Utstyret som benyttes er stort sett likt, og det kan også her brukes både toppdrevet rigg og kellyrigg. Rotasjonshastigheten er mye lavere enn ved direkte sirkulasjon, men på grunn av at borestrengen veier mer er penetrasjonshastigheten likevel høyere. Revers sirkulasjon er spesielt nyttig ved boring av grovkornede sedimenter som sand eller grus, fordi sedimentene kan fjernes uten at de må knuses. Dette betyr at boringen vil gå veldig fort (Misstear et al, 2006).

Under boreprosjektet i Asker ble brønn vest boret med toppdrevet rotasjonsrigg og to ulike typer borekroner, PDC-krone og rullemeiselkrone, fra 200 meter og ned til 800 meter. De

første 200 meter ble boret på samme måte som brønn øst. Borefluidet ble sirkulert på innsiden av borerørene og ut gjennom borekrona, ved direkte sirkulasjon. Borefluidet som ble brukt var rent vann, uten noen form for tilsetninger. Dette er svært vanlig ved boring av brønner til grunnvarmeformål i Norge, i følge brønnborer i Båsum Boring AS. Vannet ble etter bruk sirkulert inn i en container hvor kaksen fra vannet ble fjernet for at vannet skulle gjenbrukes i brønnen.

Rullemeiselborekrona

Den vanligste typen borekrona brukt i rotasjonsboring er rullemeiselborekrona. Denne har tre hjul med tagger på, som ruller mot hverandre når borekrona treffer berggrunnen. Størrelsen og formen på taggene tilpasses etter formasjonen. Det brukes gjerne små og mange tagger for boring i harde formasjoner og store men færre tagger for boring i myke formasjoner (Sterrett, 2007). En typisk rullemeiselborekrona er vist i figur 12.



Figur 12: Rullemeiselborekrona med mange små tagger (Baker Hughes, 2015).

PDC-borekrone

En spesiell type borekrone, kalt PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*), er montert med syntetiske diamantbiter/diamantstøv på kutteelementet (figur 13). Denne typen borekrone ble i utgangspunktet utviklet spesielt til boring i formasjoner som er for myke eller klebrige for konvensjonelle borekroner. De er også ofte foretrukket til boring av dype brønner, da de er mindre utsatt for slitasje enn konvensjonelle rullemeiselkroner.

En PDC-borekrone består av bare en del, noe som gjør at koblinger og smøremiddel ikke er nødvendig (Sterrett, 2007). Ved boring av brønnene i Asker ble en PDC-borekrone brukt, for at den skulle holde lengst mulig før utskiftning. Borekrona som ble benyttet er vist i figur 13.



Figur 13: PDC-borekrone tilhørende Båsum Boring AS. Kutteelementene har blitt montert med et «støv» av diamant ytterst på flaten.

Mens en PDC-borekrone koster ca 50 000 kroner vil en konvensjonell rullemeiselkrone koste omtrent 5000 kroner. Til gjengjeld vil levetiden for en PDC-krone være ca 10 000 meter, mens det for en rullemeiselkrone vil være 1000 meter eller lavere (Båsum Boring AS, muntlig overføring, 2016).

Under boringene ved Føyka ble rullemeiselborekrone og PDC-krone brukt om hverandre fra 200 meter og ned til 800 meter i brønn vest.

2.4 Støping av borehull med betongtrommel

Ras i formasjonen underveis i boringen kan føre til at det ikke er mulig å bore videre og ras etter hullet er boret kan gjøre det vanskelig å installere kollektoren. Det var derfor et ønske om å forhindre begge disse utfallene ved å kontrollere ras fra formasjonen. Ras forekommer gjerne i soner med mye sprekker eller dårlig berg. En løsning som ble utprøvd for å minimere denne risikoen var å støpe igjen rasfarlige soner med betongtrommel for hurtigstøping i brønn. Støping kan også være en løsning der store vannførende sprekker gir nedsatt borehastighet, da sprekkenes kan støpes igjen slik at boring kan fortsette som normalt.

2.5 Laboratoriemetoder

2.5.1 Borbarhet

En bergarts borbarhet er viktig informasjon før det skal bores et hull. Borbarheten bestemmes ut fra ulike tester, utført etter NTNU-Sintef-metode, ved å benytte tre parametre - borsynkindeks (DRI), Borekroneslitasje (BWI) og *Cutter Life Index* (CLI). Sliteevnen til borekrona kan også bestemmes av sliteevneparameteren VHNR (*Vickers Hardness Number of Rock*). Disse parameterene har blitt utviklet for boring i forbindelse med tunnelbygging og har ikke blitt brukt i stor grad i sammenheng med grunnvarmeboring tidligere. Teststandardene måtte derfor modifiseres for å tilpasses det materialet som var tilgjengelig fra de borede brønnene ved Føyka.

Borsynkindeksen (DRI) er et mål på bergartens sprøhet, justert for bergartens overflatehardhet. Den er funnet ved to laboratorietester, sprøhetstesten og Sievers J-verditest, og er gitt i lengde boret per tid. Borekroneslitasjeindeksen (BWI) er et estimat på borekronens levetid og er beregnet som levetid gitt av boret lengde eller volum. Parameteren er bestemt av borsynkindeksen og abrasjonsverdien for wolframkarbid (AV). Cutter life index (CLI) er et mål for kutterens levetid og beregnes ved hjelp av Sievers J-verdi og abrasjonsverdien for stålkuttere (AVS) (Dahl, 2003). Sliteevneparameteren VHNR beregnes ved å først finne

mineralsammensetningen til prøven, før hardhetstallet beregnes ut ifra denne. For å finne mineralsammensetningen kan røntgendiffraksjon (XRD) benyttes (Dahl, 2003).

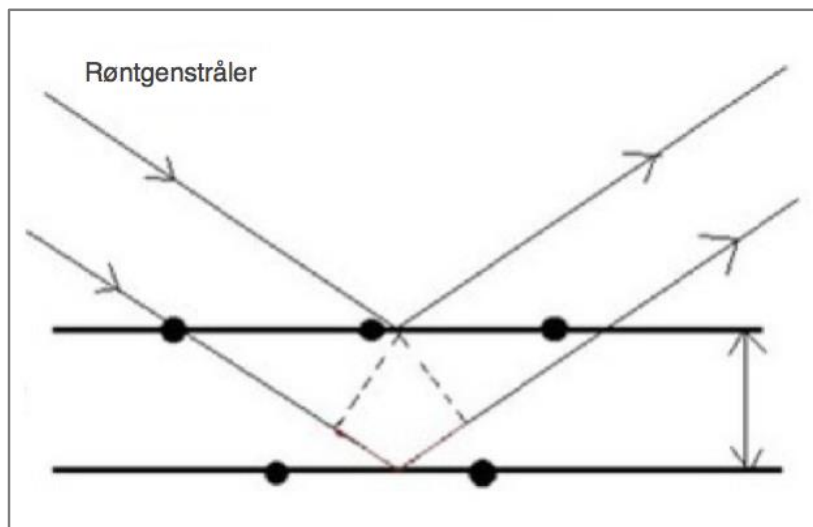
Materialet som ble tatt ut fra brønnene ved Føyka var i små fragmenter og alle testene for borbartighet var derfor ikke mulig å gjennomføre. Det ble benyttet et utvalg av testene for å undersøke potensiell slitasje. Testmetodene som ble benyttet i forbindelse med denne oppgaven vil bli presentert nærmere i de neste kapitlene.

2.5.2 Røntgendiffraksjon (XRD)

Røntgendiffraksjon (XRD) benyttes til identifikasjon av ulike mineraler i en prøve fra bergart, bergmasse eller løsmasser. Identifikasjon av mineralene skjer ved å sende en monokromatisk røntgenstråle med varierende innfallsvinkel mot en krystallflate. Når strålen treffer krystallflaten vil den reflekteres, og disse refleksjonene registreres i et diffraktogram (figur 15). Refleksjonsvinkelen er avhengig av gitteravstanden mellom ulike plansett i krystallstrukturen, noe som kan vises med Braggs lov:

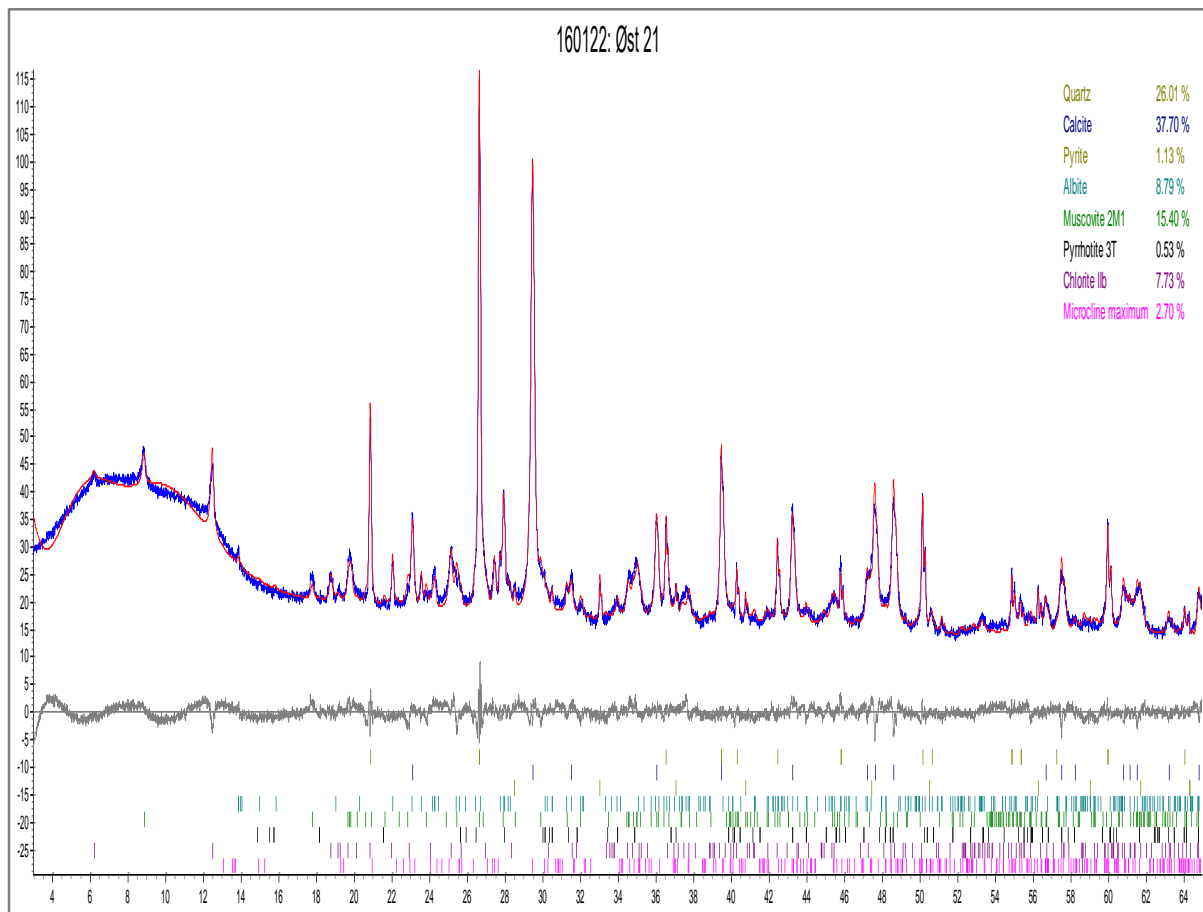
$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta,$$

der λ er bølglengden til røntgenstrålen, d_{hkl} er gitteravstanden mellom plansettene og θ er refleksjonsvinkelen. Ved bruk av et diffraktometer hvor bølglengden til røntgenstrålen er kjent, kan gitteravstanden regnes ut fra Braggs lov og måling av refleksjonsvinkelen. Prinsippet for refleksjon vises i figur 14.



Figur 14: Refleksjon av røntgenstråle mot en krystallflate. Modifisert etter (Chemwiki, 2016).

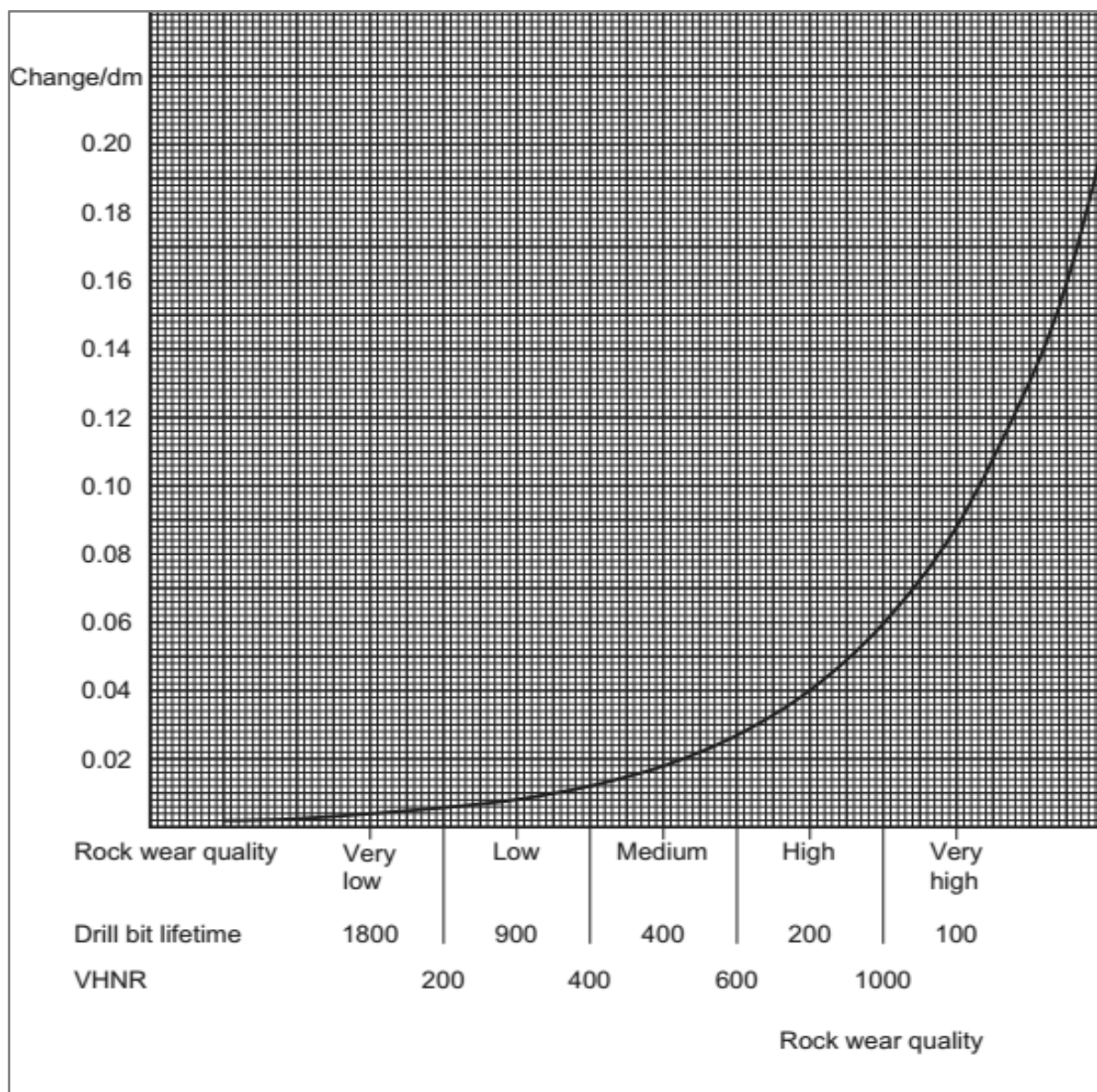
Alle mineraler vil gi ulikt mønster i diffraktogrammet som dannes ved røntgendiffraksjon, noe som gjør at de alle har et slags fingeravtrykk som kan gjenkjennes. For å bestemme hvilke mineraler som er til stede i en prøve kan mønsteret som oppstår ved røntgendiffraksjon sammenlignes med mønstre for kjente mineraler, som finnes i en database (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2015) . Diffraktogrammet i figur 15 viser resultatene fra XRD-analyse av en prøve som inneholdt mye kvarts, kalsitt og glimmer. Y-aksen i figuren viser intensiteten til refleksjonene, mens x-aksen viser gitteravstandene (d_{hkl}). I databasen finnes en oversikt over toppene til kjente mineraler og ved hvilken d-verdi de skal oppstå. For eksempel vises en tydelig topp ved en d-verdi på omtrent 26 i figur 15. Topper ved denne verdien indikerer at det kan være kvarts i prøven, og ved å dobbeltsjekke om det er topper ved de andre d-verdiene for kvarts kan det verifiseres om dette stemmer. I tilfellet i figur 15 var det 26 % kvarts i prøven.



Figur 15: Diffraktogram for en av prøvene det ble utført XRD-analyse av. Prøven er fra 21 meters dybde i brønn øst. Laget av Laurentius Tjihuis, 2016.

2.5.3 VHNR

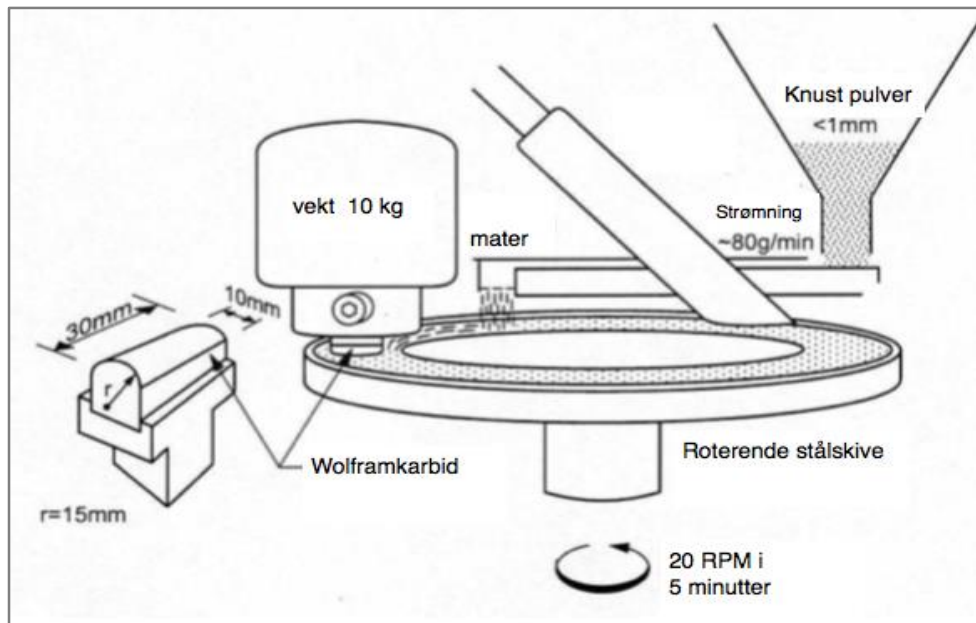
VHNR er en parameter som vanligvis benyttes for å bestemme slitasjen på en borekone brukt til tunnelboring, og står for *Vickers Hardness Number of Rock*. VHNR beregnes ved å finne sammensetningen av ulike mineraler i området det skal bores, for så å beregne det totale hardhetstallet ut fra prosentandel mineraler og deres hardhetstall. Sammensetningen av mineraler fås fra XRD-analyse. Hardhetstall for de ulike mineralene finnes i tabell, for eksempel har kvarts et hardhetstall på 1060. Når VHNR er funnet, kan slitasjen på borekone bestemmes i forhold til om den er veldig lav, lav, medium, høy eller veldig høy. Slitasjen bestemmes fra figur 16, med hensyn på mineralsammensetning og VHNR (Bruland, 1998).



Figur 16: Diagram som bestemmer om slitasjen på borekone er lav eller høy ut fra VHNR. (Zare, 2007)

2.5.4 Abrasjonsverdi (AV)

Abrasjonsverdien forteller hvor mye slitasje en bergmasse vil gjøre på wolframkarbid og stål over tid. Bergmassen blir knust ned til et pulver som roteres på en plate under et prøvestykke av stål eller wolframkarbid for å måle vekttapet abrasjonen medfører på materialet. Samtidig som apparatet (figur 17) roterer, blir pulveret fordelt jevnt utover platen. Steinpulveret fungerer som sandpapir mot overflaten av testmaterialet og blir byttet ut for hver rotasjon.



Figur 17: Apparat for testing av abrasjonsverdi med wolframkarbid som kuttermateriale. Modifisert etter (Dahl, Draft: DRI, BWI, CLI Standard, 2003).

Testmaterialet, et lite stykke med wolframkarbid eller stål, blir presset mot den roterende platen av et 10 kg tungt lodd i henholdsvis 5 min (100 rotasjoner) for testing av wolframkarbid og 1 min (20 rotasjoner) for testing av stål. Stål- og wolframkarbidprøvene blir veid før og etter testing til nærmeste millimeter (figur 18), og vektdifferansen er den beregnede abrasjonsverdien (Dahl, 2003).



Figur 18: Veiing av wolframkarbidprøve for bestemmelse av abrasjonsverdi.

Det målte vekttapet, abrasjonsverdien, gir et mål på forventet slitasje for en borekrone som skal benyttes ved boring i bergmassen (Dahl, 2003).

2.5.5 Differensialtermisk analyse (DTA)

Differensialtermisk analyse (DTA) går ut på å varme opp et fast stoff til en gitt temperatur for å registrere varmetoningene som oppstår. Varmetoningene registreres ved hjelp av termoelementer som måler forskjellen i temperatur for stoffet, sammenlignet med et termisk inaktivt stoff. Både eksoterme og endoterme varmetoninger kan registreres og reaksjonene skyldes forandringer i krystallstrukturen til materialet. DTA-kurver som lages ut fra varmetoningene og temperaturen kan brukes til å bestemme spesifikke mineraler og deres innhold i en prøve. Dette kan gjøres fordi mange mineraler har karakteristiske DTA-kurver som lett kan gjenkjennes. Det vil si at de ved en gitt temperatur normalt sett har enten en endoterm eller eksoterm reaksjon. Integrasjon over arealet til reaksjonsutslaget i DTA-kurven kan benyttes til å beregne prosentandel av det gitte mineralet i en prøve ved bruk av et dataprogram (Sintef, 2016).

2.6 Energi fra dype boringer i Norge – viktige forhold og potensial

Nyere teknologi har siden starten av 2000-tallet redusert kostnader forbundet med boring av brønner i norske, krystalline bergarter. Effekten av den nye teknologien i forhold til dype brønner er enda usikker, da erfaringer med slike boringer er mangelfulle. Konservativitet i forhold til boremetoder og utstyr er et problem som holder utviklingen tilbake. For å skape framgang i grunnvarmebransjen må en videre satsning på ny teknologi som fører til kostnadsreduksjoner gjennomføres. Det er også viktig at teknologien tilpasses boring på land, da det er store forskjeller på landboring og boring i nordsjøen (Norconsult AS, 2012).

Et eksempel på boreteknologi under utvikling for boring på land er Wassaras hydraulisk drevne senkhammer. Sammenlignet med tradisjonelle boremetoder utviklet for oljeindustrien skal denne hammeren være overlegen til dype boringer (500-1000 meters dybde). Metoden er likevel enda under utvikling og lite utprøvd på grunn av små forbedringsbehov, som behovet for veldig god vannkvalitet på vannet som går gjennom utstyret. Når forbedringsbehovene er rettet opp vil sannsynligvis metoden bli testet av flere borefirmaer (Norconsult AS, 2012).

Det er ikke bare innenfor boreteknologi det finnes forbedringspotensiale i forhold til dype brønner. Det ble avholdt Workshop på NGU for fagpersoner i prosjektet ORMEL (Optimal ressursutnyttelse av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus og Elverum) 7. april 2016. Her var fagpersoner med ulik bakgrunn samlet for å diskutere ORMEL og problemer og muligheter for grunnvarmebransjen ble også tatt opp. Et av temaene som ble diskutert var problemer med dårlig retningskontroll ved boring av brønner. På grunn av at retningen ikke overvåkes underveis i boringen har det vært tilfeller hvor brønner har tatt uønskede retninger og endt opp i feil område. Eksempler på boring inn i tunnel eller naboens hage ble nevnt. Utstyr for retningskontroll med bruk av fiberoptisk kabel (DTS) ved grunnvarmeboring er under utvikling i CMR (*Christian Michelsen Research*), men dette er enda på planleggingsstadiet. Utviklingen av utstyr for retningskontroll vil med boring av flere dype brønner være av stor betydning for grunnvarmebransjen.

Hvis grunnvarme i form av grunne og dype brønner skal bli mer benyttet i Norge i årene framover vil det også være lønnsomt å utarbeide retningslinjer for utbyggingen. For å utnytte

ressursene i grunnen best mulig er det viktig at de blir ivaretatt. Bores det mange brønner i et område vil grunnen over tid kunne bli nedkjølt slik at ressursen etterhvert minker.

Det var fra statlig hold planlagt at årsproduksjonen av fornybar energi i Norge fra 2001-2016 skulle økes med 30 TWh (Fossdal et al, 2007). Nye byggforskrifter basert på EUs bygningsdirektiv krever også at alle nybygg inntil 500 m² skal ha fornybare energikilder som dekker 40 % av energibehovet, mens det i bygg over 500 m² skal dekke 60% av oppvarmingsbehovet (Fornybar.no, 2009). Et viktig bidrag i disse målene vil være grunnvarmeløsninger, i tillegg til vannkraft, vindkraft og bioenergi (Ramstad, 2011). Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) har anslått at bruk av grunnvarme og varmepumper har et teknisk potensial for en energibesparelse på 37 TWh (Fornybar.no, 2009).

Som nevnt i innledningen har dype brønner til grunnvarmeutnyttelse mange fordeler. Likevel kan det, særlig i tettbygde strøk, være en utfordring med tilstrekkelig areal til grunnvarmeuttak. Dype brønner satt i sammenheng med et balansert energilager, som planlagt ved Føyka i Asker, gir god utnyttelse av det tilgjengelige arealet, samtidig som det er tilpasset forholdene her i Norge. Dette gjelder spesielt for anlegg til et større antall bygninger i de store byene hvor bygningene står tett og det er begrenset med areal å ta av.

3 METODE

I dette kapittelet vil metodene som ble brukt til innsamling og testing av prøver fra brønnene ved Føyka beskrives. I tillegg vil feltarbeid utført ved Føyka bli presentert.

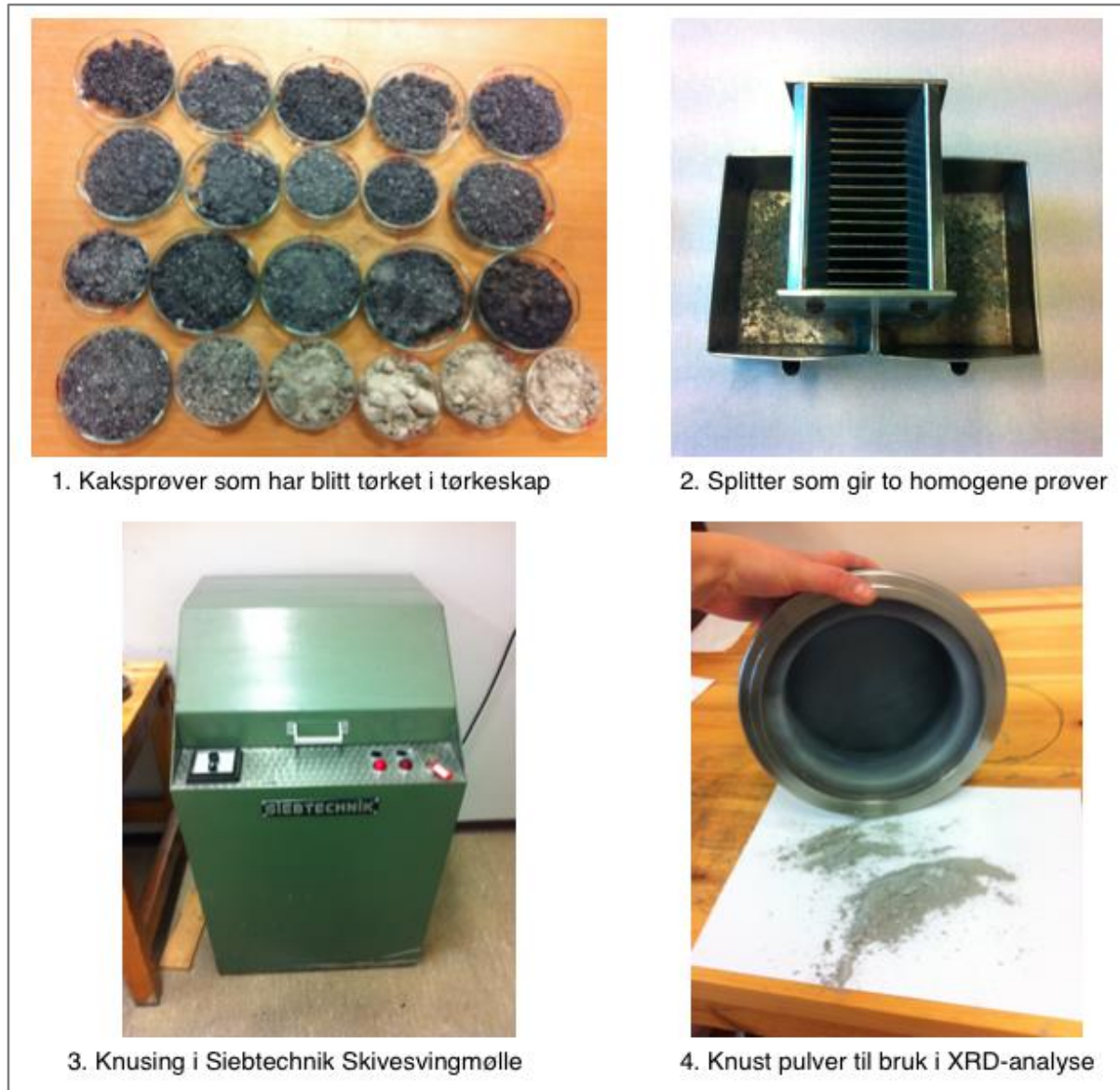
3.1 Innsamling av borekaks

Prøver av borekaks på ca 2 kg ble hentet ut av brønnene på Føyka for hver 20. meter som ble boret, før de ble pakket i poser og fraktet til Trondheim for testing i laboratoriet på NTNU. Prøvene ble tatt av brønnborer på stedet og det ble forsøkt å få til et representativt utvalg av materialet som kom ut av brønnen. Detaljert prøvetakingsplan vises i vedlegg B.

I brønn vest ble det tatt prøver fra dybden 15 m - 195 m. Det ble ikke tatt prøver videre nedover i denne brønnen, på grunn av at det tok for lang tid å samle sammen materiale fra brønnen til at det var mulig å ta prøver hver 20. meter. I brønn øst ble det tatt prøver fra dybden 21 m - 801 m.

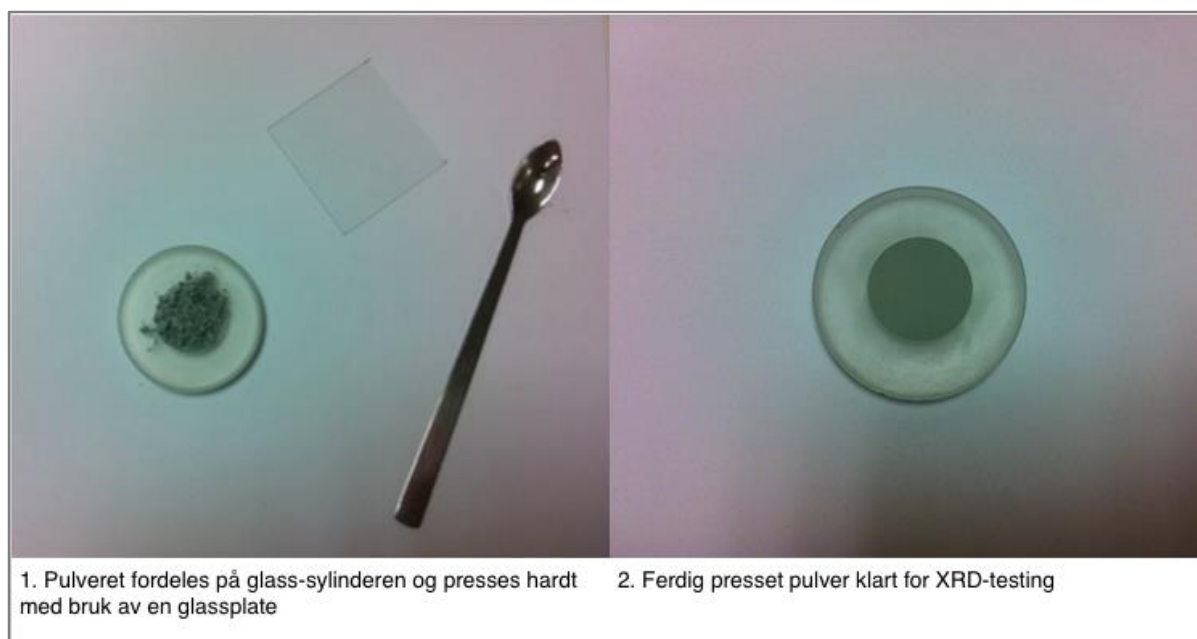
3.2 Røntgendiffraksjon (XRD)

For å gjennomføre røntgendiffraksjon på borekakset ble en mengde på ca en håndfull valgt ut fra hver prøve for tørking og knusing. Hver prøve ble tørket i tørkeskap, før den ble splittet i splitter (figur 19) i flere runder, til prøven veide mellom 15 og 25 gram. Deretter ble prøvene knust ned til et fint pulver i Siebtechnik Skivesvingmølle (figur 19).



Figur 19: Prepareringsmetode for kaksprøver som ble brukt til XRD-analyse.

Noe av pulveret fra hver prøve (ca en teskje) ble deretter fordelt på små sylindere av glass og presset til et hardt belegg med en glassplate (figur 20), før det ble satt i driffaktometeret for testing.



Figur 20: Preparering av prøve til XRD-analyse.

Når diffraktometeret hadde kjørt ferdig, ble prøvene analysert med et dataprogram for bestemmelse av mineraler og sammensetning. Dataprogrammet hjelper til å bestemme mineraler ved bruk av en innebygd database som inneholder informasjon om hvordan diffraktogrammet til ulike mineraler ser ut. De aktuelle mineralene som blir foreslått må gjennomgå av prøvetaker for å dobbeltsjekke at mineralene faktisk er tilstede i prøven. Dataprogrammet er en mulig feilkilde og derfor må alt sjekkes nøye og bekreftes av fagperson. Når prøvetaker har bekreftet mineralinnholdet, kan programmet beregne prosentandeler av hvert mineral i prøvene.

3.3 VHNR

For å beregne VHNR ble mineralsammensetningen til prøvene, som ble bestemt fra resultatene av XRD-analysen, benyttet. Hardhetstallet for de ulike mineralene (tabell 1) ble deretter brukt til å beregne VHNR for hele bergmassen, etter formelen:

$$VHNR = x_1VHN_1 + x_2VHN_2 + x_3VHN_3 + \dots,$$

der x_1 er prosentandel av mineral nummer 1 i prøven, VHN_1 er hardhetstallet til mineral nummer 1, x_2 prosentandelen av mineral nummer 2 i prøven og så videre.

Tabell 1: Hardhetstallet (VHN) for ulike mineraler, i kg/mm^2 , brukt til bestemmelse av VHNr (Bruland, 1998 & Uetz et al, 1986).

VHN FOR ULIKE MINERALER	
Mineral	VHN
	[kg/mm^2]
Kvarts	1060
Kalsitt	125
Muskovitt	65
Flogopitt	65
Kloritt	50
Albitt	850
Pyrrhotitt	310
Pyritt	800
Kalifeltspat	790
Dolomitt	365
Pyroksen	800
Hornblende	600
Epidot	900
Jernspat	430
Kobberkis	195
Grossular	1060
Clinozoisite	900
Rhodochrosite	365
Prehnitt	800

Tabell 1 er sammensatt av noen verdier fra (Bruland, 1998) og noen fra (Uetz et al, 1986). For kvarts, kalsitt, kloritt, pyrrhotitt, pyritt, dolomitt, pyroksen, hornblende, granat (grossular) og jernspat finnes verdier for hardhetstallet i (Bruland, 1998). Tabellen fra dette heftet anvendes mye i dag og verdiene som finnes der er derfor «godkjente» verdier å benytte i testing. Verdiene for hardhetstallet til muskovitt, flogopitt, albitt, kalifeltspat, epidot, kobberkis, clinozoisite, rhodochrosite og prehnitt finnes ikke i dette heftet og disse er derfor tatt fra (Uetz et al, 1986). I denne boken finnes hardhetstallet for de fleste mineraler, der noen har blitt beregnet fra Mohrs hardhet og andre er målte verdier. For muskovitt, flogopitt, albitt, kobberkis og epidot ble verdier som var omregnet fra Mohrs hardhet benyttet, mens det for kalifeltspat fantes målte verdier som antas å være mer nøyaktige. Rhodochrosite fantes ikke i (Uetz et al, 1986) og verdien for dolomitt ble derfor benyttet, da disse to mineralene har lignende kjemisk formel og lik Mohrs hardhet. Verdien for prehnitt ble anslått fra verdien for feltspat, på grunnlag av samme antagelse. Clinozoisite kalles også aluminium epidot og verdien for epidot ble derfor benyttet da denne ikke fantes i (Uetz et al, 1986).

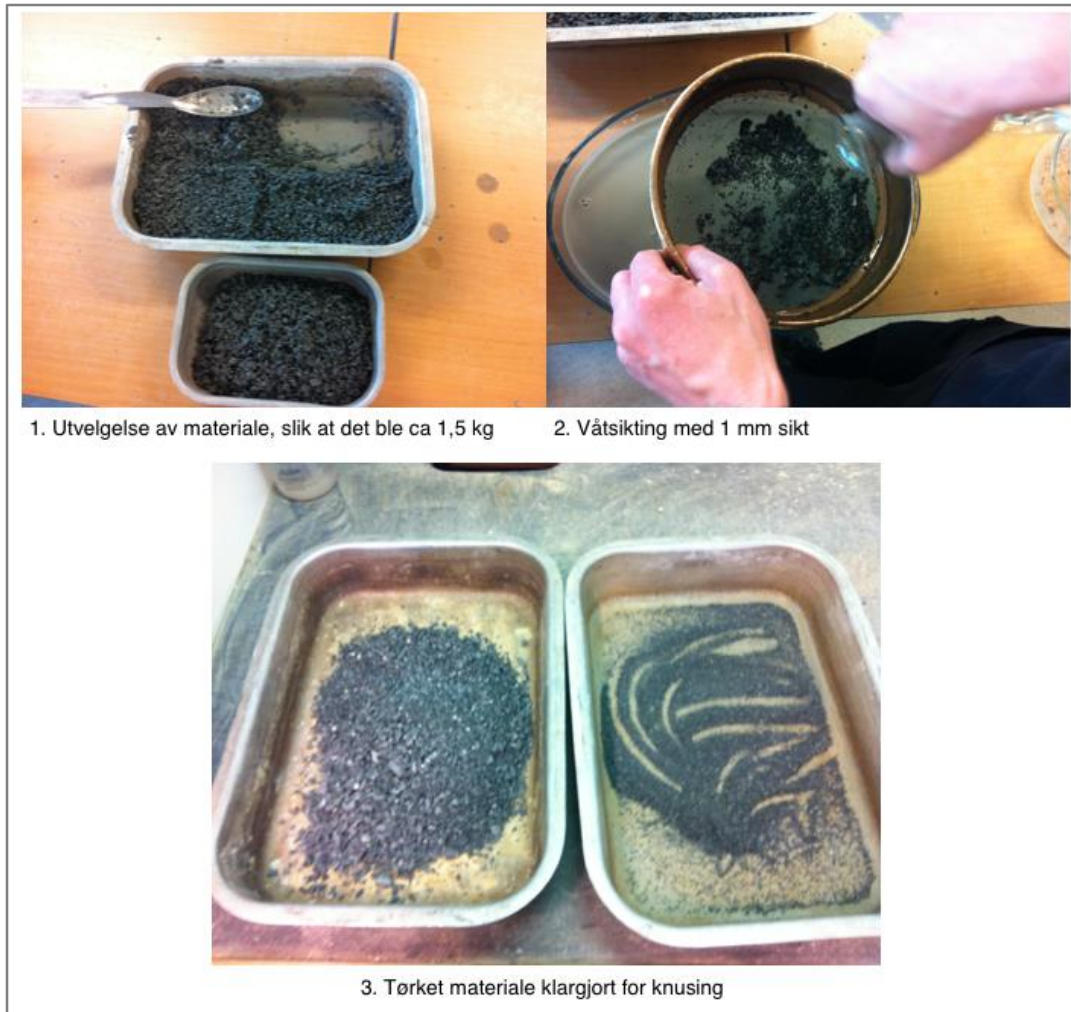
Hardhetsverdiene i (Uetz et al, 1986) er noen steder oppgitt i intervall. Der dette var tilfelle ble det regnet ut et gjennomsnitt for å få best mulige verdier.

VHNR ble beregnet for alle prøvene, det vil si for hver 20. meter i brønnen. Ved å sammenligne verdiene for VHNR med diagrammet i figur 16 ble det bestemt om slitasjen på borekrona var veldig lav, lav, medium, høy eller veldig høy.

3.4 Abrasjonsverdi (AV)

For å finne abrasjonsverdien (AV) ble en mengde på ca 1,5 kg valgt ut fra prøvematerialet ved å dele i flere like deler (figur 21). Dette var viktig for at prøven skulle være representativ for hele bergmassen. Mengden prøve ble deretter våtsiktet med 1 mm-sikt (figur 21) og all masse mindre enn 1 mm lagt i egen beholder. Dette ble gjort fordi det var antatt at de minste fraksjonene ville forstyrre testingen ved å smøre utstyret. Bergmasseprøven ble deretter satt i tørkeskap over natten. Videre ble fraksjonen over 1 mm knust gradvis ned til steinpulver ved å bruke en skivemølle først innstilt på 3 mm og deretter på 1 mm og 0,5 mm. Dette ble gjort i flere runder, med sikting gjennom 1 mm-sikt for hver runde, til 99 % av massen var innenfor fraksjonen mindre enn 1 mm.

Normalt sett skal det ved testing av abrasjonsverdi velges ut et representativt stykke fra berget som skal knuses ned for å få mest mulig like forhold i prøven som det er i virkeligheten. Prøvemethoden som ble brukt med borekaks som materiale er derfor modifisert etter den originale prøvestandarden som anvist fra (Dahl, 2003).



Figur 21: Prepareringsmetode for kaksprøver som ble brukt i AV-test.

Når bergmassen var ferdig tørket og nedknust ble den helt over i apparatet for testing av abrasjonsverdi. Det ble testet i to runder, en gang med stål som kuttermateriale og en gang med wolframkarbid.

Sammenligning med figur 22 viser om slitasjen ligger i kategorien ekstremt lav – ekstremt høy basert på abrasjonsverdien ved testing av wolframkarbid. I kolonnen til høyre i figuren vises kumulativ prosentandel av prøver som normalt sett er innenfor de forskjellige kategoriene.

Category – abrasion on tungsten carbide	AV (mg)	Cumulative percentage (%)
Extremely high	≥58.0	95–100
Very high	42.0–57.9	85–95
High	28.0–41.9	65–85
Medium	11.0–27.9	35–65
Low	4.0–10.9	15–35
Very low	1.1–3.9	5–15
Extremely low	≤1.0	0–5

Figur 22: Kategorisering av slitasje basert på abrasjonsverdi i mg for wolframkarbid (Dahl et al, 2012).

Sammenligning med figur 23 viser om slitasjen ligger i kategorien ekstremt lav – ekstremt høy basert på abrasjonsverdien ved testing av stålprøven. I kolonnen til høyre i figuren vises kumulativ prosentandel av prøver som normalt sett er innenfor de forskjellige kategoriene.

Category – abrasion on cutter steel	AVS (mg)	Cumulative percentage (%)
Extremely high	≥44.0	95–100
Very high	36.0–44.0	85–95
High	26.0–35.9	65–85
Medium	13.0–25.9	35–65
Low	4.0–12.9	15–35
Very low	1.1–3.9	5–15
Extremely low	≤1.0	0–5

Figur 23: Kategorisering av slitasje basert på abrasjonsverdi i mg for stål (Dahl et al, 2012).

Ved testing av abrasjonsverdien ble det først valgt ut den prøven som inneholdt mest kvarts, da kvarts er et av mineralene som normalt sett gir mest slitasje på boreutstyr (se tabell 1). Prøven som ble testet var fra brønn øst på 321 meters dyp (Ø321). Tanken var å teste om denne prøven i det hele tatt ville gi noe slitasje, for å bestemme om det var nødvendig å gjennomføre tester på flere prøver med lignende sammensetning.

3.5 Differensialtermisk analyse (DTA)

Ved differensialtermisk analyse benyttes også et fint pulver i apparatet. Klargjøring av prøver til denne testen gjøres derfor på samme måte som ved XRD-analyse. Ved preparering til XRD-testing ble det preparert for mye pulver. Det samme pulveret ble derfor benyttet også til DTA.

På grunn av at AV-testene indikerte lav slitasje ble det bestemt å gjennomføre en differensialtermisk analyse (DTA) av to prøver. Det ble valgt ut en prøve med høyt kvartsinnhold og en med lavt kvartsinnhold, prøve Ø321 og Ø161. Prøvene ble plassert i apparatet sammen med en prøve av aluminiumoksid, som er et termisk inaktivt materiale. De ble dermed varmet opp til 700 °C i testapparatet og reaksjonene avlest fra reaksjonsplottet.

3.6 Feltarbeid i Asker

Feltarbeid i Asker ble utført mandag 2. mai 2016 for å samle inn prøver fra boringen ved Føyka til videre testing og informasjon om boringen med resultater. Målet med feltarbeidet var å samle mest mulig informasjon og dette ble gjort gjennom å være på stedet og undersøke, samt intervju brønnborere og andre som var tilstede ved anlegget.

Feltarbeid kan være svært nyttig også i forbindelse med en teoretisk oppgave, fordi det gir praktisk erfaring å være på stedet og se hva som foregår. Det er også mye lettere å forstå teorien når det er muligheter for å sammenligne med opplevd praktisk gjennomføring i felt.

4 RESULTATER

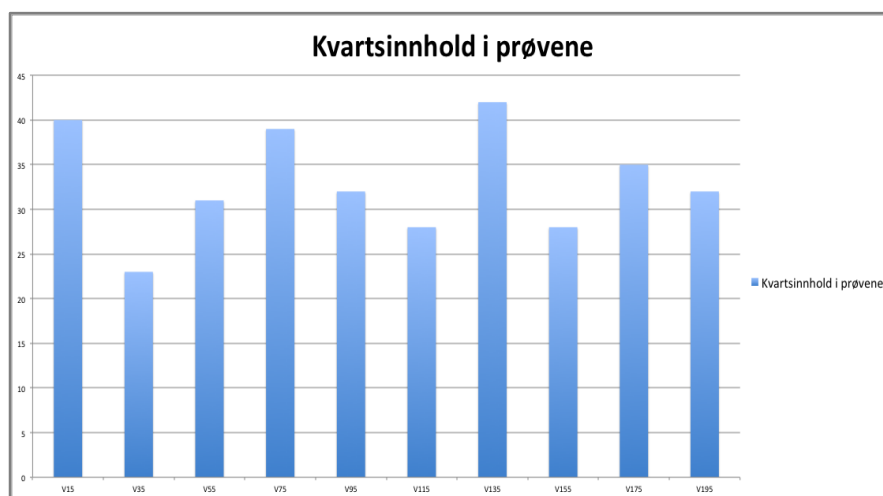
4.1 Røntgendiffraksjon (XRD)

Resultater fra 10 prøver i brønn vest som ble XRD-testet er samlet i tabell 2, hvor mineralene tilstede i prøven samt prosentandel av disse vises.

Tabell 2: Mineralinnhold i prosent til prøvene fra brønn vest, med start på 15 m dyp (V15) og slutt på 195 m dyp (V195). Kolonner med 0 betyr at det er < 1 % av mineralet i prøven.

Prøve	Mineralinnhold i %												
	Kvarts	Kalsitt	Glimmer		Kloritt	Feltspat	Magnetkis	Svovelkis	Kalifeltspat	Dolomitt	Pyroksen	Hornblende	Epidot
			Muskovitt	Flogopitt		Albitt	Pyrrhotitt	Pyritt	Mikroclin		Diopsid		
V15	40	7	19	0	15	13	1	0	5	0	0	0	0
V35	23	46	10	0	8	8	0	1	4	0	0	0	0
V55	31	30	16	0	9	10	0	1	3	0	0	0	0
V75	39	14	20	0	13	11	1	0	2	0	0	0	0
V95	32	17	24	0	14	10	1	0	2	0	0	0	0
V115	28	13	31	0	16	8	0	1	3	0	0	0	0
V135	42	22	8	0	8	13	1	0	6	0	0	0	0
V155	28	38	1	0	2	10	1	0	7	0	8	5	0
V175	35	26	6	0	9	14	1	0	7	0	1	1	0
V195	32	31	13	0	11	9	1	0	3	0	0	0	0

Som tabell 2 viser var det mye kvarts, kalsitt, glimmer, kloritt og feltspat i de fleste prøvene fra brønn vest. Diffraktogram for prøvene er samlet i vedlegg C1. Kvartsinnholdet for prøvene fra brønn vest er også framstilt i diagrammet i figur 24.



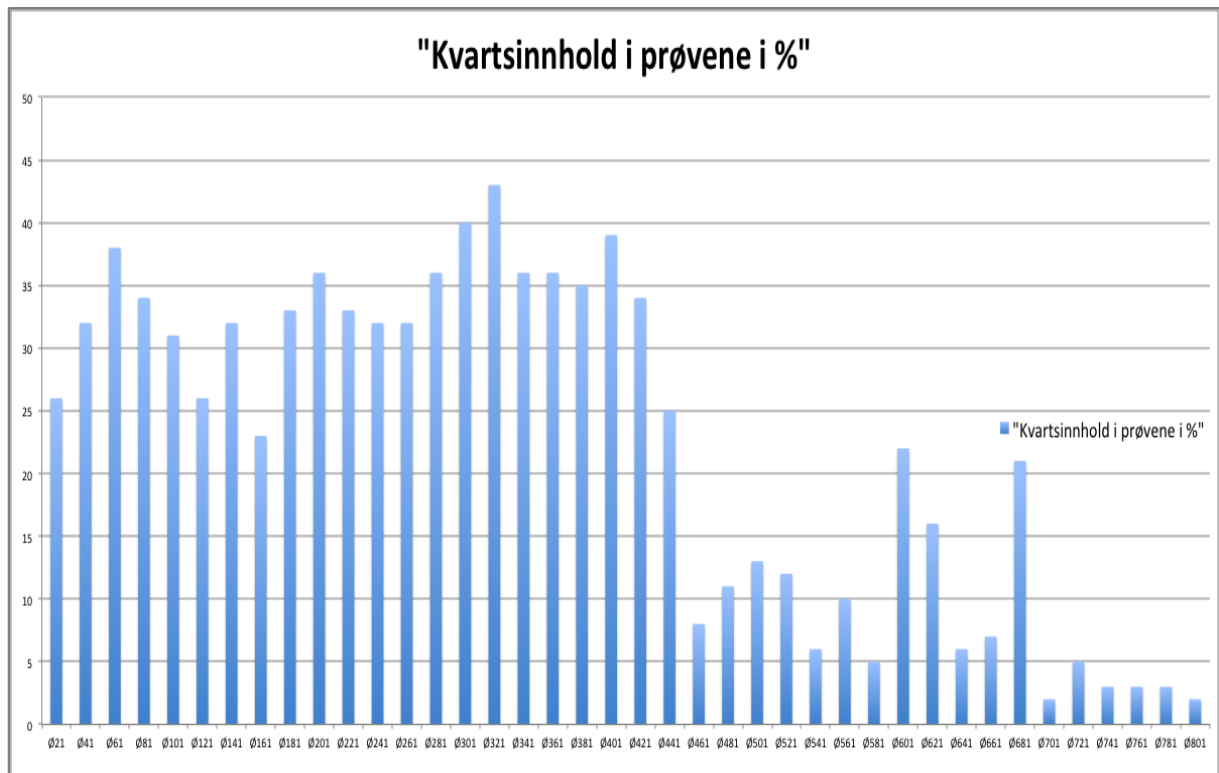
Figur 24: Kvartsinnhold i prøvene fra brønn vest, oppgitt i %.

Tabell for mineralinnholdet vises i tabell 3 for de 40 prøvene som ble testet fra brønn øst. Det ble laget diffraktogram for alle prøvene og disse er samlet i vedlegg C2.

Tabell 3: Mineralinnhold i prosent til prøvene fra brønn øst, med start på 21 m dyp (Ø21) og slutt på 801 m dyp (Ø801). Kolonner med 0 betyr at det er < 1 % av mineralet i prøven.

Prøve	Mineralinnhold i %																				
	Kvarts		Kalsitt		Glimmer		Kloritt	Feltspat	Magnetkis	Sovelkis	Kalifeltspat	Dolomitt	Pyroksen	Hornblende	Epidot	Jernspat	Kobberkis	Grossular	Clinozoisite	Rhodochrosite	Prehnitt
			Muskovitt	Flogopitt		Albitt	Pyrrhotitt	Pyritt	Mikroclin		Diopsid				Siderite	Chalcopyrite	Granat				
Ø21	26	38	15	0	8	9	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø41	32	31	16	0	9	9	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø61	38	17	19	0	11	12	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø81	34	21	17	0	11	11	1	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø101	31	12	25	0	16	10	1	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø121	26	46	8	0	8	9	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø141	32	47	3	0	6	8	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø161	23	21	1	0	4	14	1	0	14	0	3	14	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø181	33	30	8	0	12	10	1	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø201	36	24	8	0	14	10	1	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø221	33	21	15	0	16	10	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø241	32	23	12	0	18	7	1	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø261	32	24	12	0	18	7	1	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø281	36	22	10	0	15	11	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø301	40	12	11	0	16	13	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø321	43	12	14	0	13	13	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø341	36	22	14	0	14	9	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø361	36	24	6	8	12	8	1	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø381	35	21	7	6	16	8	1	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø401	39	14	0	8	11	12	1	0	12	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø421	34	9	0	11	13	14	0	0	15	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø441	25	10	0	16	4	20	0	0	9	0	2	11	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø461	8	9	0	5	13	44	1	0	12	0	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Ø481	11	33	0	4	3	18	1	0	12	0	12	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø501	13	19	0	6	6	18	0	0	14	0	14	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø521	12	12	0	3	9	22	1	0	21	0	15	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø541	6	3	0	1	15	16	1	0	33	0	11	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø561	10	1	0	4	16	23	0	0	31	0	7	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø581	5	1	3	0	17	36	0	0	22	0	9	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Ø601	22	1	0	22	8	25	1	0	14	0	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø621	16	1	2	26	7	28	0	0	13	0	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø641	6	1	0	9	11	26	0	0	25	0	14	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø661	7	0	0	17	8	40	0	0	16	0	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ø681	21	0	0	17	9	26	1	0	21	0	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ø701	2	1	0	5	4	17	0	0	40	0	15	7	0	0	0	2	5	0	0	2	2
Ø721	5	2	0	2	5	7	0	0	15	0	24	2	0	0	0	8	14	16	0	0	0
Ø741	3	2	0	0	7	5	0	1	4	0	30	0	1	0	0	38	6	0	0	3	3
Ø761	3	2	0	0	7	3	0	0	10	0	37	0	0	0	1	30	7	0	0	0	0
Ø781	3	2	0	0	5	3	0	1	9	0	35	0	0	0	0	34	8	0	0	0	0
Ø801	2	2	0	0	6	3	0	0	11	0	35	0	0	0	0	33	8	0	0	0	0

Som tabell 3 viser var det mye kvarts, kalsitt, glimmer, kloritt og feltspat i prøvene fra den øverste delen av brønn vest (ca. 0-440 meter). Videre nedover i brønnen var en seksjon med mye feltspat, kalifeltspat og pyroksen (ca. 440-700 meter). De siste hundre metrene i brønn øst inneholdt mye kalifeltspat, pyroksen og granat (ca. 700-801 meter). Kvartsinnhold i prøvene fra brønn øst vises også i diagrammet i figur 25.



Figur 25: Kvartsinnhold i prøvene fra brønn øst, oppgitt i %.

4.2 VHNR

Beregnet VHNR for prøvene som ble testet fra brønn vest vises i tabell 4. Den høyeste verdien var ved 135 meters dybde, hvor VHNR-verdien var 643. Verdien resulterer i en slitasje som kategoriseres som høy fra figur 16. De fleste verdiene ligger innenfor kategorien medium slitasje fra figur 16.

Tabell 4: VHNR for prøvene fra brønn vest og slitasjekategorien verdiene tilsvarer.

Prøve	VHNR	Slitasjekategori
V15	606	Høy
V35	419	Medium
V55	498	Medium
V75	563	Medium
V95	487	Medium
V115	441	Medium
V135	643	Høy
V155	583	Medium
V175	603	Høy
V195	495	Medium

Beregnet VHNR for prøvene fra brønn øst vises i tabell 5. De høyeste verdiene finnes ved 700-800 meter og tilsvarer en slitasje i kategorien høy fra figur 16. De fleste verdiene befinner seg i kategorien høy slitasje fra figur 16.

Tabell 5: VHNR for prøvene fra brønn øst og slitasjekategorien verdiene tilsvarer.

Prøve	VHNR	Slitasjekategori
Ø21	445	Medium
Ø41	493	Medium
Ø61	563	Medium
Ø81	539	Medium
Ø101	495	Medium
Ø121	438	Medium
Ø141	498	Medium
Ø161	658	Høy
Ø181	534	Medium
Ø201	567	Medium
Ø221	518	Medium
Ø241	503	Medium
Ø261	496	Medium
Ø281	564	Medium
Ø301	628	Høy
Ø321	636	Høy
Ø341	541	Medium
Ø361	537	Medium
Ø381	532	Medium
Ø401	660	Høy
Ø421	660	Høy
Ø441	653	Høy
Ø461	640	Høy
Ø481	634	Høy
Ø501	545	Medium
Ø521	604	Høy
Ø541	655	Høy
Ø561	668	Høy
Ø581	671	Høy
Ø601	663	Høy
Ø621	633	Høy
Ø641	587	Medium
Ø661	655	Høy
Ø681	648	Høy
Ø701	669	Høy
Ø721	732	Høy
Ø741	711	Høy
Ø761	850	Høy
Ø781	821	Høy
Ø801	854	Høy

4.3 Abrasjonsverdi (AV)

Den første prøven (Ø321) som ble testet for å finne abrasjonsverdien var fra brønn øst på 321 meters dyp. Resultatene fra testingen vises i tabell 6. AV står for abrasjonsverdien til wolframkarbidprøven og AVS for abrasjonsverdien til stålprøven.

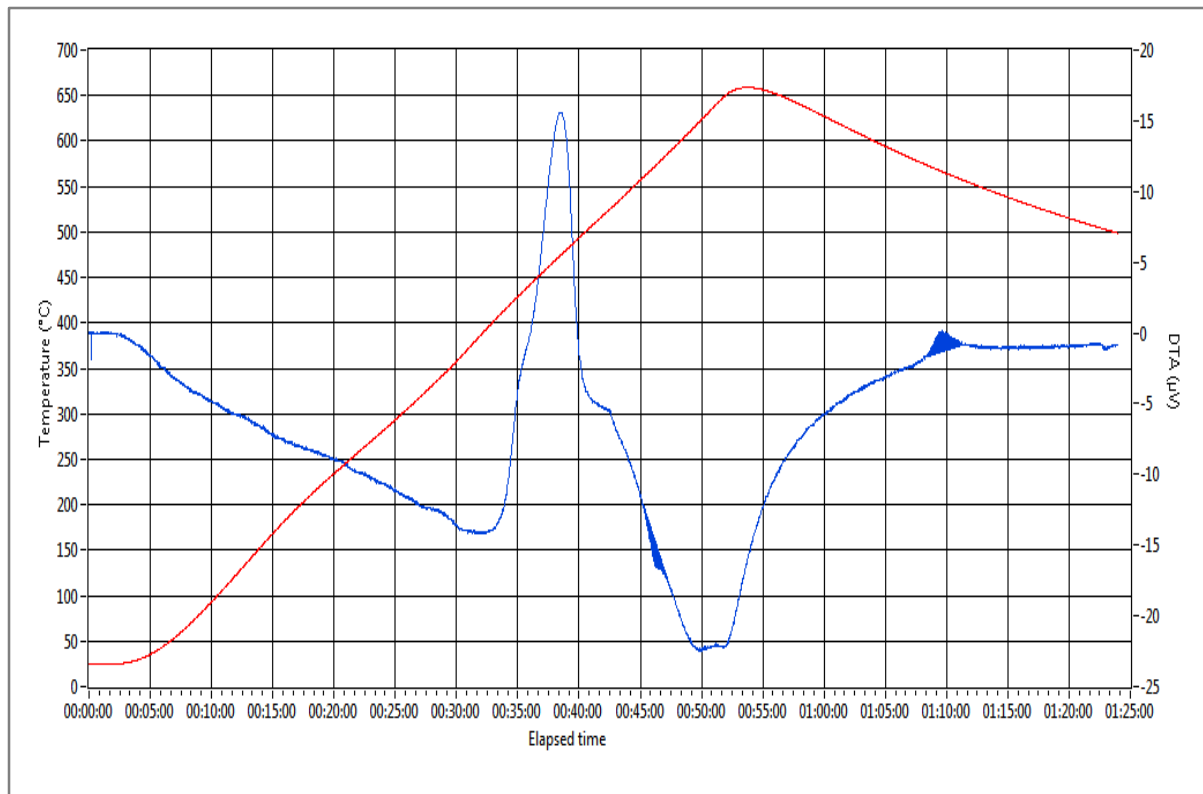
Tabell 6: Abrasjonsverdi for stålkutter (AVS) og wolframkarbidkutter (AV) for prøven fra brønn øst på 321 meters dyp (Ø321).

Prøvenr	Ø321
AV før [g]	66,503
AV etter [g]	66,503
AVS før [g]	36,019
AVS etter [g]	36,018
Beregnet AV [g]	0
Beregnet AVS [g]	0,001

Slitasjen ville i følge figur 22 vært ekstremt lav ved testing på wolframkarbid for denne prøven. I følge figur 23 ville slitasjen vært ekstremt lav ved testing på stål også for denne prøven.

4.4 Differensialtermisk analyse (DTA)

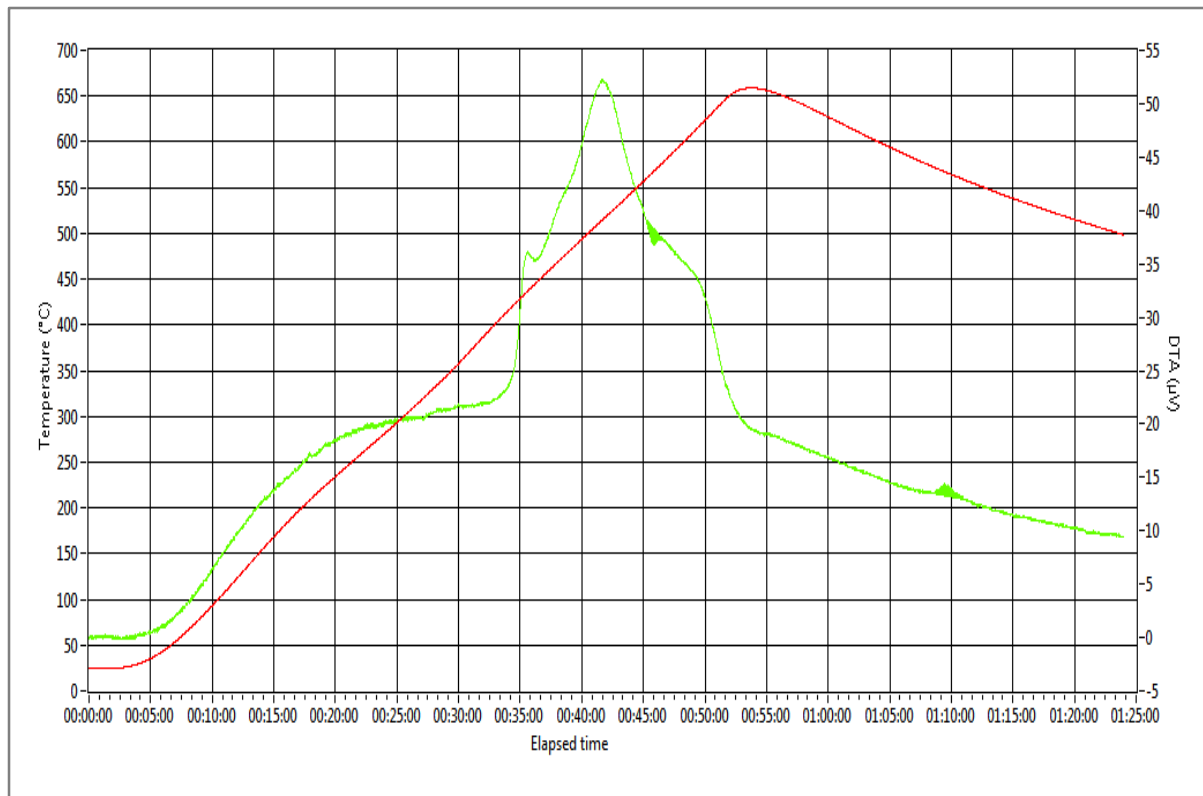
Resultater fra DTA vises i reaksjonsplottet i figur 26. Den blå grafen viser reaksjonene plottet mot tiden og temperaturen for prøve Ø321 fra brønn øst på 321 meters dyp. Den røde grafen viser temperaturen gjennom hele testen.



Figur 26: Reaksjonsplott fra DTA for prøve Ø321. Blå graf viser reaksjonsforløpet per tid og temperatur, mens rød graf viser temperaturen per tid. Det skraverte området markert med blått viser reaksjonsutslagene til prøven.

Det skraverte området markert med blått i figur 26 viser arealet til reaksjonsutslagene og kvartsinnholdet blir beregnet fra integrasjon av dette arealet. Beregnet kvartsinnhold for prøven var 21 %.

Den grønne grafen i reaksjonsplottet i figur 27 viser reaksjonene plottet mot tiden og temperaturen for prøve Ø161 fra brønn øst på 161 meters dyp. Den røde grafen viser temperaturen gjennom hele testen.



Figur 27: Reaksjonsplott fra DTA for prøve Ø161. Grønn graf viser reaksjonsforløpet per tid og temperatur, mens rød graf viser temperaturen per tid. Det skraverte området markert med grønt viser reaksjonsutslagene til prøven.

Det skraverte området markert med grønt i figur 27 viser arealet til reaksjonsutslagene og kvartsinnholdet blir beregnet fra integrasjon av dette arealet. Beregnet kvartsinnhold for prøven var 14 %.

4.5 Feltarbeid i Asker

Slitasje på de ulike borekronene som ble brukt i boreprosjektet ved Føyka er framstilt i tabell 7. Tallene kommer fra intervju med brønnborer fra Båsum Boring AS. Det ble i følge Båsum benyttet fire ulike borekroner i brønn øst, mens det i brønn vest kun ble benyttet tre. Som nevnt tidligere ble PDC-krone og rullemeiselkrone benyttet i brønn vest og konvensjonell hammerboringskrone i brønn øst.

Tabell 7: Slitasje på borekronene som ble brukt i boreprosjektet ved Føyka.

Brønn	Slitasje [mm]				
	Krone 1	Krone 2	Krone 3	Krone 4	Totalt
Øst	0	1	1	1	3
Vest	0	0	0	-	0

Borekronene som ble brukt hadde i følge Båsum Boring AS lav slitasje og det oppsto ikke store problemer underveis i boringen av noen av brønnene. PDC-borekronene som ble brukt ble likevel ødelagt etter få meter med boring. Dette var ikke normal slitasje, da det oppsto sprekker i borekronene. Innimellom var det små, vanskelige soner som besto av harde, tynne lag.

5 DISKUSJON

I dette kapittelet vil resultatene og metodene diskuteres og utsettes for en kritisk analyse med utgangspunkt i teori, sammenligning med data fra Sintef-NTNU og diskusjon med fagpersoner. Testmetodene vil sammenlignes for å se hvorvidt de korrelerer med hverandre og virkeligheten. PDC-borekrone vil bli diskutert med tanke på lønnsomhet i forbindelse med grunnvarmeboring.

5.1 Abrasjonsverdi (AV)

Prøven som ble testet for abrasjonsverdi inneholdt 43 % kvarts (tabell 3), noe som blir sett på som høyt kvartsinnhold i forbindelse med boring. Tabell 6 viser at abrasjonsverdien var 0 g ved testing av wolframkarbidkutter, mens den var 0,001 g ved testing av stålkutter. Dette er i kategorien ekstremt lav for abrasjonsverdi og testen indikerer at det ikke ville bli noe slitasje på boreutstyret fra denne seksjonen i brønnen. De prøvene som hadde lavere kvartsinnhold enn Ø321 og ikke inneholdt andre harde mineraler ble derfor ikke testet for abrasjonsverdi. For disse prøvene var antagelsen at det, i følge AV-test, ikke ville blitt noe slitasje på boreutstyret som ble benyttet.

I brønnseksjonen fra 701 meter til 801 meter var sammensetningen av mineraler svært ulik resten av brønnen. Prøvene herfra inneholdt lite kvarts, men i noen av prøvene fantes mye granat, som er et mineral som også normalt sett er hardt å bore gjennom. Hardhetstallet for granat er det samme som for kvarts (se tabell 1). Materialet fra denne seksjonen var svært finkornet og minnet mer om løsmasse enn bergart. Det meste var i sandfraksjon. Brønnborer fra Båsum Boring AS kommenterte at det gikk veldig lett å bore gjennom materialet. På grunnlag av disse opplysningene ble det ikke utført AV-test av denne seksjonen, da det ikke hadde noen hensikt å gjøre test av bergmasse som minnet mer om løsmasse.

I brønn vest hadde også alle prøvene som ble tatt lavere kvartsinnhold enn Ø321. Et problem med brønn vest var at det var vanskelig å få ut nok kaks til å gi nok prøvemateriale for AV-testing. Ingen av prøvene fra brønn vest ble derfor testet for abrasjonsverdi. Hypotesen, med grunnlag i AV-test av Ø321, var at det ikke ville bli mye slitasje på boreutstyret i brønn vest heller. Dette gjelder imidlertid kun for det intervallet som gjennomgikk XRD-analyse, det vil si fra start og ned til 195 meters dybde.

5.1.1 Sammenligning med verdier fra AV-testing i Oslofeltet

Sintef-NTNU har hatt flere oppdrag som innebar testing av abrasjonsverdi for skifer- og kalksteinsbergarter i Oslofeltet tidligere. Testene ble tatt i forbindelse med ingeniørgeologiske undersøkelser til for eksempel tunnelbygging. Data med resultater fra testingen vises i tabell 8. De fleste abrasjonsverdiene fra tidligere testing ligger også i kategorien ekstremt lav i følge figur 22 og 23. Det er også tatt med noen verdier fra testing i andre bergarter i Oslofeltet, til sammenligning. Kvartsitt som ble testet har eksempelvis en abrasjonsverdi for wolframkarbid på 116, noe som resulterer i en slitasjeverdi i kategorien ekstremt høy.

Tabell 8: Verdier for AV og AVS ved testing i Oslofeltet. Data fra Sintef-NTNU

FYLKE	FYLKE	STED	MERKNAD	BERGART	KORN	AV	AVS
Akershus	Akershus	Asker kommune		LEIRSKIFER		2	
Oslo og Akershus	Majorstua - Torshov		Kloakktunnel	LEIRSKIFER		0,5	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Majorstua - Torshov Pel 170		LEIRSKIFER		0,2	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Skytterdalen Pel 200		KALKSTEIN		0,4	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Majorstua		LEIRSKIFER		0,5	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Majorstua	Menaitt	LEIRSKIFER		0,9	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Holmen		LEIRSKIFER		0,6	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Skytterdalen		LEIRSKIFER		0,5	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Sentrum stasjon Pel 523		ALUNSKIFER	Svært fin	3	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Vålerenga vegtunnel		LEIRSTEIN		2,6	0,4
Buskerud	Buskerud			LEIRSTEIN	Fin	18	39
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus			KALKSTEIN	Fin	0,3	0,3
Oslo	Oslo	Fjellinjen, Oslo		LEIRSKIFER		0,2	0,1
Oslo	Oslo	Fjellinjen, Oslo		ALUNSKIFER		0,6	0,1
Oslo	Oslo	Fjellinjen, Oslo		ALUNSKIFER		0,9	0,9
Oslo	Oslo	Fjellinjen, Oslo		ALUNSKIFER		0,1	0,1
Akershus	Akershus	Sandvika, Bærum		KALKSTEIN		0,4	0,1
Oslo	Oslo	Granfosslinjen	Dolomittholdig	KALKSTEIN		1	1
Oslo	Oslo	Oslo		KALKSTEIN		1	
Oslo	Oslo	Oslo		KALKSTEIN		1	
Oslo	Oslo	Oslo		KALKSTEIN		1	
Akershus	Akershus	Asker		KALK-LEIRSKIFER		0,5	
Akershus	Akershus	Asker		KALKSTEIN		0,5	
Akershus	Akershus	Bærum		KALKSTEIN		0,5	
Oslo	Oslo	Oslo		ALUNSKIFER		0,5	
Oslo	Oslo	Oslo		ALUNSKIFER		0,5	
Oslo	Oslo	Oslo		ALUNSKIFER		0,5	
Os/Akerh/Brud/Vfold				KALKSTEIN		0,5	0
Buskerud	Grodalen			SVARTSKIFER		0,3	
Buskerud				KALKSTEIN		0,5	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Franzebråten - Majorstua	Knollekalk	KALKSTEIN		2,5	0
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Franzebråten - Majorstua		LEIRSKIFER		1,2	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Franzebråten - Majorstua		LEIRSKIFER		1,2	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Majorstua - Ruseløkka		LEIRSKIFER		0,5	
Oslo og Akershus	Oslo og Akershus	Majorstua - Ruseløkka		KALKSKIFER		0,5	
TIL SAMMENLIGNING							
Buskerud	Buskerud		Dagprøve	KVARTSITT	Fin til middels	116	63
Buskerud	Buskerud			GLIMMERSKIFER	Fin	102	6,8

Sammenlignes resultatene fra testing i borehullene ved Føyka (tabell 6) med verdiene i tabell 8 vises det at verdiene har lite avvik. Tidligere testing i kalk-leirskifer og kalkstein i Asker har resultert i abrasjonsverdier på 0.5 mg, mens verdien fra Føyka var 1 mg. Begge tilfellene ville gitt en slitasje som var ekstremt lav i følge figur 22 og 23. Tabell 8 viser at lave verdier for abrasjonsverdi er en gjennomgående trend i kalksteins- og leirskiferbergarter i Oslofeltet. Det

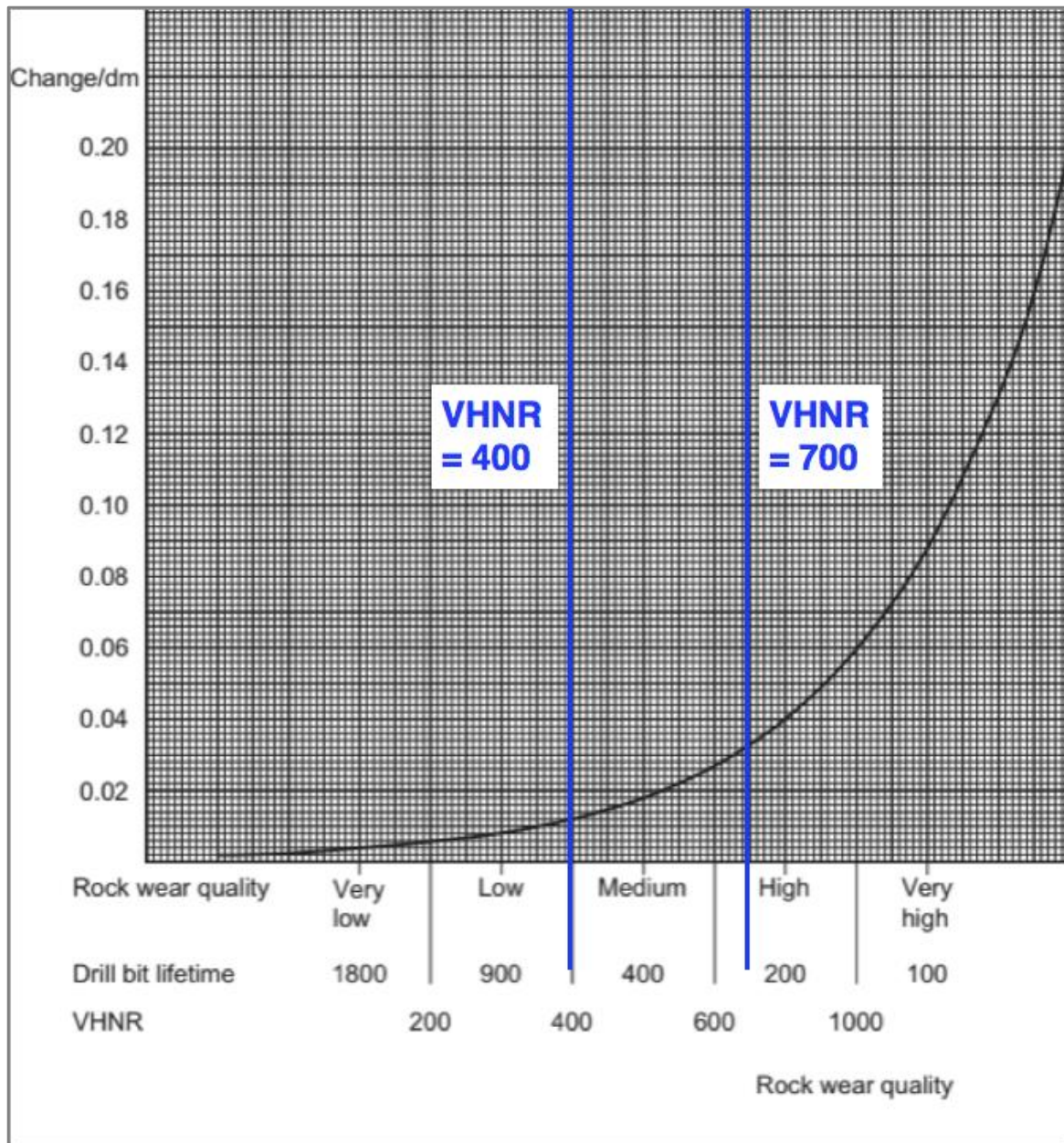
er derfor sannsynlig at avvikene for abrasjonsverdien sammenlignet med virkeligheten ikke kan forklares med prøvetakingen eller at metoden ikke fungerer på materialet fra brønnboring. Andre årsaker må derfor være gjeldende for den lave korrelasjonen med virkelig slitasje.

5.2 Differensialtermisk analyse (DTA)

DTA ble utført på to prøver fordi tidligere erfaringer ved Sintef-NTNU hadde vist at det kunne bli forskjeller i kvartsinnholdet fra XRD-analyse og DTA. Testen ble gjennomført for å undersøke om resultatene fra AV-testen muligens kunne forklares med hva slags type kvarts som var tilstede i prøven, da DTA ikke alltid fanger opp alle kvartskorn. Ved testing på materiale med korn mindre enn $2 \mu m$ er erfaringen fra Sintef-NTNU at kornene blir for små for DTA-test. Forklaringen på dette er muligens at bergarten ikke er krystallin. Da DTA ga en nesten halvert prosentandel kvarts for den prøven som fra XRD-analyse skulle inneholde mest, kan dette sies å være en mulig forklaring på de lave abrasjonsverdiene (Dahl, muntlig overføring, 2016).

5.3 VHNR

Resultatene fra VHNR-beregning (tabell 4 og 5) viser at alle verdiene for VHNR i brønn øst og brønn vest ligger mellom 400 og 700, med unntak av de siste 100 metrene i brønn øst som besto av sandlignende materiale. Disse verdiene ble det valgt å se bort i fra, da det ikke var gunstig å beregne slitasjen i noe som minnet mer om løsmasser enn hardt fjell. Hvis disse verdiene ikke tas i betraktning, ligger de fleste verdiene innenfor kategorien medium slitasje fra figur 30, med noen verdier i høy slitasje-kategorien.



Figur 28: VHNR ligger mellom 400-700 for alle prøvene fra brønn vest og brønn øst, med unntak av sandseksjonen fra 700-800 meter i brønn øst. Modifisert etter (Zare, 2007).

5.4 Virkelig slitasje

Tall fra Båsum Boring AS (tabell 7) viser at slitasjen på borekronene var gjennomgående lav. I følge brønnborer for selskapet var slitasjen på de fire konvensjonelle hammerboringskronene lav, sammenlignet med boring i andre områder. Erfaring fra tidligere boringer var at det ofte var mer slitasje i områder som inneholdt så mye kvarts som i brønn øst.

I brønn vest vistes ikke slitasje på rulleborekronene i det hele tatt. Det ble i noen deler av brønnen brukt PDC-krone og flere av de utprøvde kronene ble ødelagt. Årsaken til dette var ikke slitasje fra berggrunnen, men at borekrona var skjør og sprakk i følge Båsum Boring AS.

5.5 Sammenligning abrasjonsverdi, VHNR og virkelig slitasje

Resultatene fra AV-test og beregning av VHNR viser at det er liten korrelasjon mellom testene. Verdiene for abrasjonsverdi indikerer at slitasjen ville vært veldig lav i hele brønnseksjonen for brønn vest og brønn øst i de områdene hvor prøver ble tatt. VHNR-verdiene viser derimot stort sett medium slitasje på boreutstyr, med noen tilfeller av høy slitasje. De virkelige resultatene viser at slitasjen var gjennomgående lav. Det skal likevel bemerkes at det var slitasje på borekronene i brønn øst og at slik slitasje vil ha betydning for videre bruk av kronene. Det var derfor ingen av testene som korrelerte helt med virkeligheten.

5.5.1 Mulige feilkilder og årsaker

At ingen av testene korrelerer med virkelig slitasje kan ha mange årsaker. Årsaker har blitt diskutert muntlig med ulike fagpersoner innenfor geologi og borbarhet for å finne en best mulig forklaring. Filip Dahl (Sintef), Bjørge Brattli (NTNU) og Amund Bruland (NTNU) har alle bidratt i muntlig diskusjon som har lagt grunnlaget for de følgende avsnittene.

Sedimentære bergarter

Boring i bergarter innebærer interaksjon med kompliserte systemer i grunnen som består av både mineralkorn som danner komponentene i bergarten og bindingene og grensene mellom dem. Sedimentære bergarter, som de ved Føyka i Asker, er som tidligere nevnt bergarter dannet av sedimenter som har gjennomgått diagenese (Bryhni, 2009). Fordi disse bergartene ikke er mer omdannet er grensene mellom kornene ofte svake. Ved boring gjennom slike bergarter kan grensen mellom kornene ha mer å si for slitasjen som oppstår på boreutstyret enn mineralkornene i seg selv. Hvis grensene mellom kornene brytes lett, vil boring gjennom soner med mye kvarts kunne forekomme uten store problemer. Dette til tross for det høye hardhetstallet kvartsen har (Brattli, muntlig overføring, 2016). De høye VHNR-verdiene,

sammenlignet med virkeligheten, kan muligens forklares med svake kornbindinger mellom sterke korn.

Sammenligning med AV-test som viste ekstremt lav slitasje i brønnene viser at denne testen kan være bedre egnet i tilfeller hvor bindinger mellom mineralene er viktigere enn mineralkornene. Testen tar hensyn til det faktiske materialet som blir testet, sammenlignet med VHNR som klassifiserer basert på antagelser om mineralenes opptreden. AV-testen korrelerte heller ikke fullstendig med virkeligheten, men den lå likevel nærmere enn antagelsene basert på VHNR. En mulig feilkilde ved testing av abrasjonsverdier kan være at utvalget av prøver også ble basert på mineralinnholdet. Antagelsen om at disse prøvene ikke ville gi større slitasje fordi de inneholdt mindre kvarts er også basert på mineralinnhold. Det kan tenkes at bindinger mellom andre mineralkorn hadde vært sterkere og kunne gitt et annet resultat.

Mineralsammensetningen

En bergart er som oftest sammensatt av flere mineraler med ulike egenskaper. I forbindelse med boring vil noen av disse være vanskelige å trenge gjennom, mens andre kan bidra positivt til boringen. En mulig årsak til at VHNR viser høy slitasje mens AV-test viser lav slitasje kan derfor være mineralsammensetningen i bergartene. Bergarter som inneholder mye kvarts og en del glimmer har erfaringsmessig (NTNU) vist seg å gi en lavere slitasje enn antatt fra VHNR. Dette kommer av at glimmerkornene legger seg utenpå boreutstyret og «beskytter» kvartsen. Glimmeret fungerer som et slags smøremiddel på borekrona og slitasjen blir derfor lavere enn antatt (Bruland, muntlig overføring, 2016).

Finkornet materiale

Veldig fine korn, med kornstørrelse $< 2 \mu\text{m}$, kan også i mange tilfeller føre til at slitasjen blir mindre enn antatt. Årsaken til det er at kornene legger seg utenpå materialet som testes og danner en hinne som fungerer som et slags smøremiddel slik at materialet ikke blir utsatt for reell slitasje. Da materialet som ble testet fra brønnene ved Føyka var veldig finkornet og inneholdt mye finstoff kan dette ha bidratt til de lave abrasjonsverdiene (Dahl, muntlig overføring, 2016).

Vanninnhold

Ved testing av abrasjonsverdi tørkes prøvene før de testes. In situ betingelser i et borehull innebærer som regel at vann er tilstede, noe det ikke tas høyde for i forbindelse med slitasjeberegning. Det kan tenkes at verdiene for abrasjonsverdi kunne blitt høyere med et visst vanninnhold i prøvene. Tidligere tester ved Sintef-NTNU utført på løsmasser har vist at slitasjen økte med tilsetning av vann, opp til et visst vanninnhold hvor materialet ble nesten flytende (Dahl, muntlig overføring, 2016).

Feilkilder

Metodene for testing av borbarhet og slitasje er utviklet for boring i forbindelse med tunneler. Testene er laget for standardisert boreutstyr og testmetodene stiller krav til test-materialet. For å kunne overføre testmetodene til testing på borekaks fra grunnvarmebrønner ble det gjort en del modifikasjoner. En mulig feilkilde for abrasjonsverdiene og VHNR er at materialet til testene normalt skal komme som steinblokk som blir knust ned i flere prosesser. Deretter velges det ut et representativt utvalg fra det nedknuste materialet for testing. Med tilgang på kun borekaks var det meste allerede i små kornstørrelser og materialet kan derfor ikke sies å være innenfor teststandarden.

En annen mulig feilkilde ved testingen er at materialet som ble valgt ut ikke var representativt for situasjonen nede i brønnen. Brønnborer på stedet valgte ut prøver ca hver 20. meter, men det er ingen garanti for at sammensetningen som ble valgt ut til 2 kg prøve var representativ for hele sonen. Siden mineralinnholdet har svært mye å si for VHNR er valg av representativt materiale en faktor som har stor innvirkning på denne metoden. Det er derfor en mulighet for at beregningene kunne blitt annerledes dersom en annen person hadde tatt prøvene.

5.5.2 Testmetodenes begrensninger

Når Sintef-NTNU får i oppdrag å beregne VHNR for et prosjekt, blir det som oftest utført XRD-analyse av prøven med påfølgende VHNR-beregning. Beregningene blir deretter sendt til oppdragsgiver sammen med et skjema som viser forventet slitasje ut fra beregningene. Kun enkelte ganger, ved tilfeller med mye glimmer i bergarten, gis det ekstra informasjon om forhold som kan minke den faktiske slitasjen beregnet fra VHNR (Bruland, muntlig overføring, 2016). I mange tilfeller er dette tilstrekkelig informasjon om slitasje og resultatene

stemmer godt overens med virkeligheten. I tilfeller hvor noen av forholdene nevnt i kapittel 5.5.1 virker inn på slitasje vil resultatene kunne gi store avvik, sammenlignet med virkeligheten.

Begrensninger ved testing av slitasje med abrasjonsverdi innebærer at materialet knuses ned til små fraksjoner før det testes, i tillegg til at alt vannet fjernes. Dette kan som nevnt tidligere påvirke resultatene. For å unngå mulige feilkilder forbundet med bruken av VHNR og abrasjonsverdi kan det være et godt alternativ å utføre flere tester. Ved å sammenligne abrasjonsverdi med VHNR vil mulige feilkilder kunne oppdages. Hvis testene stemmer godt overens med hverandre er det god sannsynlighet for at predikert slitasje vil korrelere med virkeligheten. Er derimot resultatene veldig forskjellige, kan innholdet i prøven, hva slags bergart det er, vanninnhold og størrelsen på kornene undersøkes nærmere for å finne forklaringer på avviket mellom testene. Med erfaringer fra boring i lignende formasjoner kan dermed slitasje-prognosen justeres etter forholdene i berget.

5.6 PDC-borekrone

PDC-borekroner er lite utprøvd i forbindelse med grunnvarmeboring. Målet med krona er at den skal være mer slitesterk enn andre, men det er flere ting som må tas i betraktning for å vurdere lønnsomheten av denne typen utstyr. For å sammenligne kostnadene forbundet med bruk av konvensjonelle rullekroner mot kostnadene forbundet med PDC må det settes opp et regnestykke med flere faktorer enn innkjøpskostnaden for borekrona og antall meter den kan penetrere før utskiftning. Faktorer som vil påvirke lønnsomheten til de to alternativene er:

- Slitasje, reparasjonskostnad og -tid
- Innkjøpskostnad
- Borehastighet og arbeidstimer benyttet
- Tidkrevende utskiftning av borekrone

PDC-krona som ble testet ved boringen på Føyka gjorde i følge brønnborene at penetrasjonshastigheten gikk betraktelig ned, sammenlignet med de konvensjonelle rullemeiselkronene. En mulig årsak til dette var at det var vanskelig å til enhver tid ha riktig vekt på krona (WoB – *Weight on Bit*) til å drive den nedover med optimal hastighet. Minket

borehastighet har den konsekvens at antall arbeidstimer øker, noe som igjen øker borekostnadene.

En PDC-krone koster som nevnt tidligere ca 50 000 kroner, mens en rullemeiselkrone koster ca 5000. PDC-krona kan brukes i ca 10 000 meter før utskiftning, mens rullekrona må byttes før den har gått 1000 meter. Et enkelt regnestykke med disse tallene indikerer at det ikke er store forskjeller i lønnsomheten til de to typene. Sammenlignes de derimot videre, med hensyn på faktorene over, vil det kunne bli et litt annet resultat. For det første vil minket borehastighet gjøre at kostnadene med PDC blir høyere, på grunn av økt antall arbeidstimer. Fordelen er likevel at slitasjen er tilnærmet ingenting og det vil derfor ikke tilkomme ekstra kostnader til reparasjoner og utskiftning.

Et problem med høy slitasje på borekroner er at det tar svært lang tid å bytte dem ut, på grunn av de lange seksjonene med rør som skal trekkes ut av hullet. For eksempel ved utskiftning av borekrone på 600 meter, med rørlengder på 12 meter, må en trekke ut 50 rør som etterpå skal sendes ned i hullet igjen. Dette er en svært tidkrevende prosess og vil føre til ekstra kostnader i form av arbeidstimer.

For å finne svar på om det er lønnsomt med PDC-kroner må antall timer ekstra på grunn av minket borehastighet sammenlignes med antall timer brukt til utskiftning av borekrone.

I tilfellet ved Føyka ble alle PDC-kronene som ble testet ødelagt etter kort boretid. Kronene var skjøre og det ble sprekker i dem raskt, i følge Båsum Boring AS. Tidligere uttesting av kronene gjennom et homogent lag med Rombeporfyr var en suksess, men i formasjonen ved Føyka som besto av flere inhomogene lag var resultatene dårlige. Båsum Boring AS var derfor ikke innstilt på videre uttesting av PDC-kroner i forbindelse med grunnvarmebrønner. For å få en optimal krone som fungerer bedre enn de konvensjonelle kronene burde en borekrone med litt dårligere slitasjeevne blitt benyttet. I følge Båsum Boring AS hadde regnestykket over vært lønnsomt med en krone som kunne benyttes i 400 meter før utskiftning.

6 KONKLUSJON

Hovedpunktene fra laboratorieundersøkelsene, feltarbeid og diskusjoner er følgende

6.1 Dype brønner

- *Vurdering av Føyka-prosjektet:* Boring av brønnene ved Føyka gikk hurtig og uten store problemer med hammerboringsteknologi og rotasjonsboring. Det var overraskende lett å komme ned til 800 meter. Videre gjenstår kun testing av oppvarmingsevnen til brønnene før de kan tas i bruk. Gir brønnene ønsket kapasitet for oppvarming må prosjektet kunne sies å ha vært svært vellykket, til tross for vanskeligheter i utprøving av nyere borekrone.
- *PDC-borekrone:* Uttesting av PDC-borekrone gikk ikke helt som forventet for Båsum Boring AS. Sannsynligheten for at borekrone vil testes videre i grunnvarmesammenheng er liten, på grunn av økonomiske faktorer. Borekroner med litt lavere motstandsevne mot slitasje enn PDC, i et annet materiale, vil sannsynligvis være et bedre alternativ. Beregninger gjort av Båsum Boring AS viste at en borekrone som kan gå omtrent 400 meter før utskiftning vil være nok til at det er lønnsomt å betale ekstra for denne. Neste steg i utviklingen vil derfor være å finne et materiale som ikke er like motstandsdyktig som diamant, men mer motstandsdyktig enn wolframkarbid. Kostnadene forbundet med bruk av konvensjonelle rullemeiselborekroner må deretter sammenlignes med kostnader for den nye typen, med vekt på faktorer som arbeidstimer, slitasje og utskiftning.

6.2 Laboratorietester

- *Modifisere testmetoder:* For å kunne benytte abrasjonsverdi og VHNR i grunnvarmesammenheng er det viktig at testene modifiseres slik at de blir tilpasset det materialet som skal testes. Kunnskap om grunnlaget for teststandardene er viktig, slik at mulige feilkilder oppdages på forhånd.
- *Anvendelse av testmetoder:* Ved testing av mulig boreslitasje er det alltid viktig å undersøke om det er spesielle forhold som vil påvirke resultatene, enten det er testing i forbindelse med tunnelbygging eller grunnvarmebrønner. Eksempler fra testing av brønnene ved Føyka viste at det er mange faktorer som må tas i betraktning for å forstå resultatene på best mulig måte. Ved VHNR-beregning og AV-test er det viktig å

huske på at kornbindinger har stor påvirkning på slitasjen, i tillegg til mineral-sammensetningen og vanninnholdet. En god måte å predikere slitasje på kunne vært å sammenligne verdier fra borbarhetstesting ved mekaniske tester med VHNR-beregninger. Korrelerer resultatene med hverandre gir det et godt grunnlag for forventet slitasje, mens hvis de avviker fra hverandre kan det være nødvendig å se nærmere på faktorer som virker inn.

- *Framtidig testing av borekaks:* For å si noe om testmetodenes egnethet for testing av borekaks vil det kreves at flere brønner blir testet på samme måte som i denne oppgaven, og resultatene sammenlignes. Resultater fra testing av brønnene ved Føyka alene viser dårlig korrelasjon med virkeligheten. Ved å se på mulige forklaringer kommer det likevel fram at resultatene kunne vært justert på forhånd hvis disse faktorene ble tatt i betraktning. Erfaringer og analyse av materialet i dype brønner kan uansett komme til nytte ved etablering av flere anlegg i Norge, hvis større områder kartlegges slik at forventet slitasje etterhvert blir en faktor basert på tidligere erfaringer.

7 VIDERE ARBEID

I denne oppgaven har det blitt sett på prøver fra to 800 meter dype brønner boret ved Føyka i Asker. Oppgaven har også innebært testing av borekaks fra disse to brønnene. For å finne svar på om tester som benyttes i forbindelse med borbarhet i tunnel kan benyttes også i grunnvarmebrønner, vil videre testing av lignende materiale være nødvendig. Testresultater må deretter sammenlignes med verdier fra virkelig slitasje, for å vise om de korrelerer eller ikke. Hvis videre testing skal forekomme for å få tilstrekkelig grunnlag for å trekke en konklusjon, må testene utføres med samme metode som i denne oppgaven. Borekaks må samles inn som angitt i vedlegg B og testene må utføres etter metodebeskrivelsene i kapittel 3. Utvikling av en nyere metode for slitasjeprognoser som tar høyde for flere faktorer enn de eksisterende borbarhetstestene kan også være et nyttig framskritt innen boring på land.

Uttesting av PDC-borekrone ble gjort under boringen av de to brønnene ved Føyka, men resultatene fra boringen var dårlige. For å finne en borekrone som fungerer optimalt ved boring av dype brønner må det undersøkes hva slags materiale som gir ønsket motstandsevne mot slitasje innenfor de økonomiske rammebetingelsene. Hvis det kan utvikles en borekrone som er mer slitesterk enn de vanlige rullemeiselkronene, samtidig som den er billigere enn en PDC-krone, vil dette ha stor betydning for den teknologiske utviklingen innen dype grunnvarmebrønner.

8 REFERANSER

BØKER, TIDSSKRIFTER OG ARTIKLER

- Acuña, J. (2010). *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers*. Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management.
- Acuña, J. (2013). *Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes*. Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management.
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, 2nd edition*. Wiley & Blackwell.
- Bockelie, J., Naterstad, J., Bockelie, T., Graversen, O., Hjelmeland, H., Larsen, B., et al. (1990). *Asker. Berggrunnskart, Asker, 18141; 1:50 000*. Asker: Norges Geologiske Undersøkelse (NGU).
- Bruland, A. (1998). *Borbarhet: Testmetoder. Prosjektrapport anleggsdrift 13A-98*. Trondheim, Norge: NTNU.
- Bruland, A. (1998). *Hard Rock Tunnel Boring*. NTNU, Civil and Transport Engineering. Trondheim: NTNU.
- Dahl, F. (2003). *Draft: DRI, BWI, CLI Standard*. Trondheim: Sintef.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P., Nilsen, B., & Grønv, E. (2012). Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 150-158.
- Elvebakk, H. (2011). *Geofysisk logging av borehull ved Arnestad skole, Asker*. Asker: Norges Geologiske Undersøkelse (NGU).
- Evensen, J., Aalhus, J., Berre, I., Bergan, H., Kleven, P., Næss, E. (2011). *Energi 21. Innsatsgruppe Fornybar termisk energi. Arbeidsgruppe Geotermisk energi*. Energi 21.
- Fossdal, M., Arnstad, E., Mathiesen, K., & Eriksen, B. (2007). *Fornybar Energi 2007*. Sweco Grøner.
- Gupta, H., & Roy, S. (2007). *Geothermal Energy; An alternative Resource for the 21st Century*. Hyderabad, India: Elsevier B.V.
- Missteart, B., Banks, D., & Clark, L. (2006). *Water Wells and Boreholes*. John Wiley & Sons Ltd.
- Norconsult AS. (2012). *Studie dypgeotermisk energi*. Enova. Trondheim: Enova SF.

- Pedersen, P., Nors, F., Løken, E., & Bugge, L. (2014). *Energiutredning Asker sentruk og Føyka/Elvely*. Asplan Viak AS & Esbensen Rådgivende Ingeniører AS.
- Pedersen, T., Kirkhusmo, L., & Kannick, H. (2003). *Overvåking av Grunnvann. Rapport nr 1/2003*. Norges vassdrags- og energidirektorat. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Ramstad, R. (2011). *Grunnvarme i Norge - kartlegging av økonomisk potensial*. Trondheim: Asplan Viak AS.
- Rosén, B., Gabrielsson, A., Fallsvik, J., Hellstrøm, G., & Nilsson, G. (2001). System för värme och kyla ur mark - En nulägesbeskrivning. *SGI*, 234.
- Sintef. (2016). *DTA - Differensialtermisk Analyse*. Trondheim: Sintef.
- Stene, J. (2000). *Varmepumper for oppvarming og kjøling av bygninger*. Avdeling Energiprosesser. Trondheim: SINTEF Energiforskning AS.
- Sterrett, R. (2007). *Groundwater and Wells* (Third Edition. utg.). Johnson Screens, A Weatherford Company.
- Uetz, H., Clement, M., Wahl, W., & Wiedemeyer, J. (1986). *Abrasion und Erosion - Grundlagen Betriebeliche Erfahrungen Verminderung*. München, Tyskland: Carl Hanser Verlag München Wien.
- Zare, S. (2007). *Drill and Blast Tunneling - Advance Rate*. Fakultet for Ingeniørvitenskap og Teknologi, Institutt for Bygg, Anlegg og Transport. Trondheim: NTNU.

NETTSIDER

- Baker Hughes. (2015). *Drill Bit Catalog*. Hentet Desember 14, 2015 fra Baker Hughes: http://assets.cmp.bh.mxmccloud.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits_Catalog_HiRes.pdf
- Bryhni, I. (2009). *Bergarter*. Hentet Mai 24, 2016 fra Store Norske Leksikon : <https://snl.no/bergarter>
- Bryhni, I. (2015, Oktober 26). *Knollekalk*. Hentet Mai 29, 2016 fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/knollekalk>
- Chemwiki. (2016). *UC Davis Chemwiki*. Hentet April 25, 2016 fra http://chemwiki.ucdavis.edu/Core/Analytical_Chemistry/Instrumental_Analysis/Diffraction/Powder_X-ray_Diffraction1
- Fornybar.no. (2009). *Geotermisk energi*. Hentet Juni 7, 2016 fra Fornybar.no: <http://www.fornybar.no/nye-teknologier/geotermisk-energi#geo3>
- NGU (2015). *Grunnvarme*. Hentet November 11, 2015 fra NGU: <http://www.ngu.no/fagomrade/grunnvarme>

Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) (2015). *XRD-Analyser*. Hentet Februar 18, 2016 fra
XRD-Analyser: <https://www.ngu.no/fagomrade/xrd-analyser>

B Prøvetakingsplan borekaks

Prøvetakingsplan

- En mengde borekaks på ca. 2 kg (omtrent 1 liter) velges ut etter hver 20. meter som blir boret eller ved merkbar forandring av fargen på kaksen. Prøven legges deretter i pose som stripses igjen.
- Fyll ut skjema for prøvetaking, samt brønnskjema. Noter nummeret som står på posen og den lille pappbiten inni.
- Lagre prøvemateriale for avhenting

a) Ta 2 kg (ca. 1 liter) prøve og pakk i pose som lukkes med strips



b) Kontrollerer nummer på posen og pappbiten inni posen



c) Fyll ut prøvetakingsskjema og brønnskjema

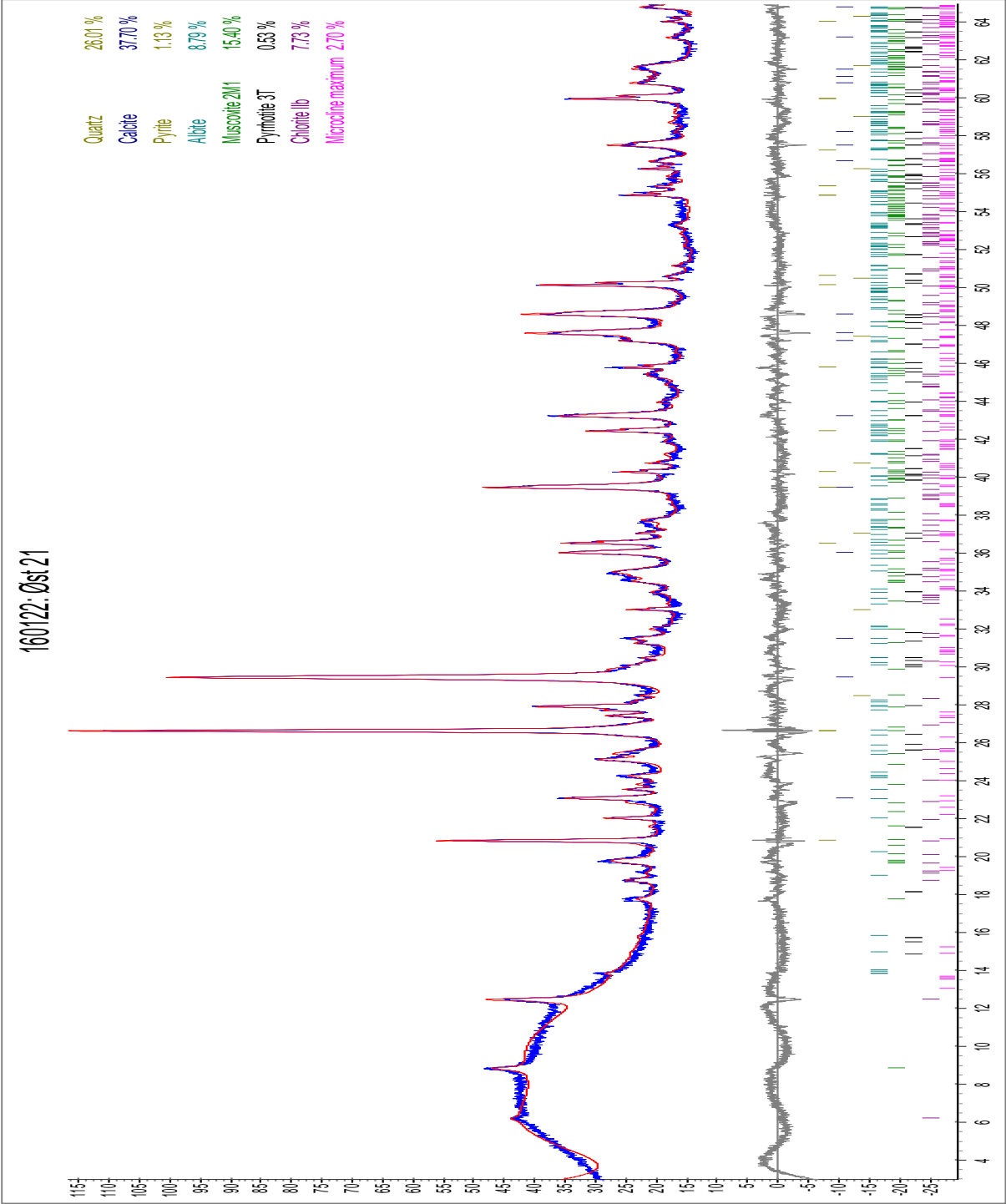


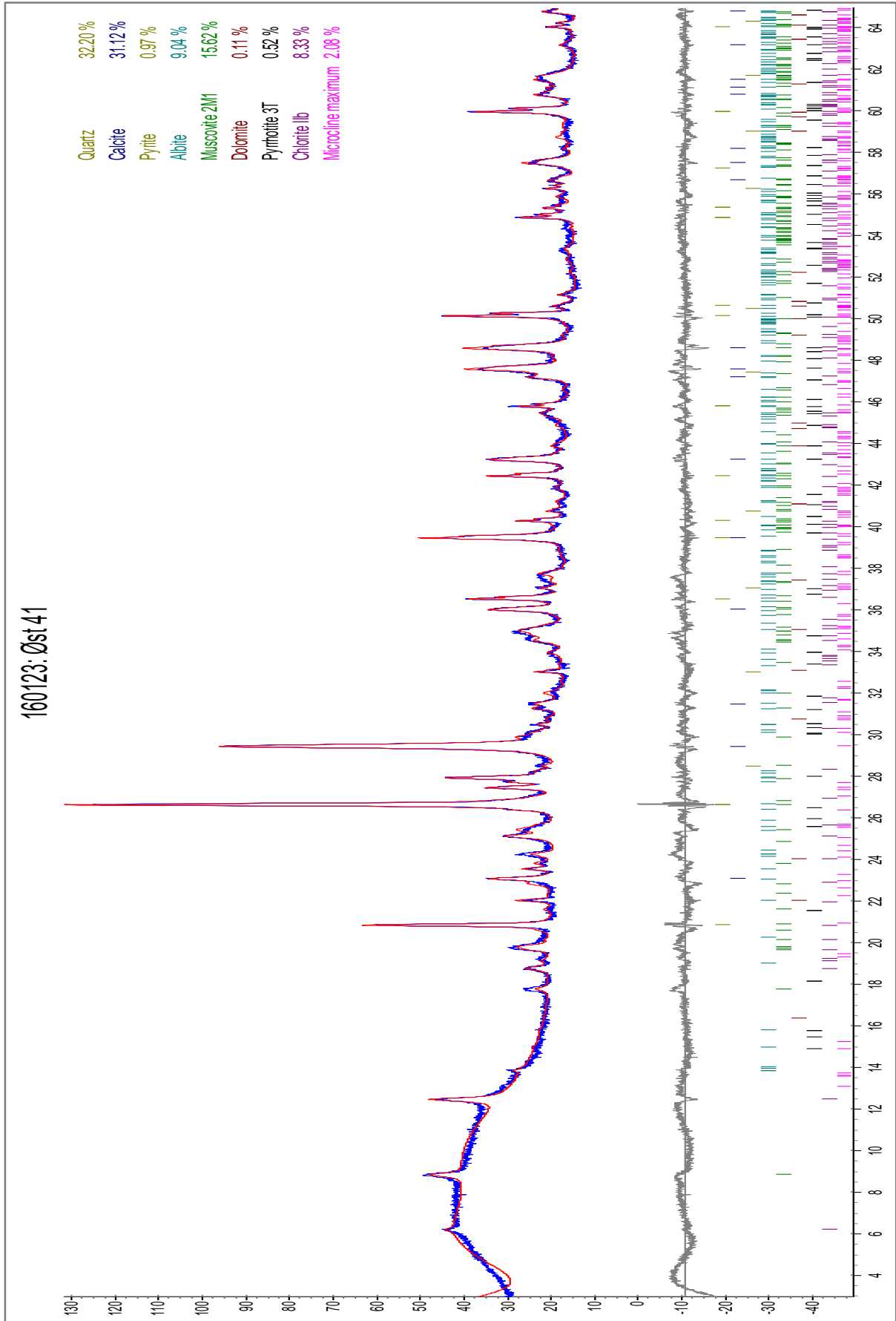
d) Lagre materiale for avhenting



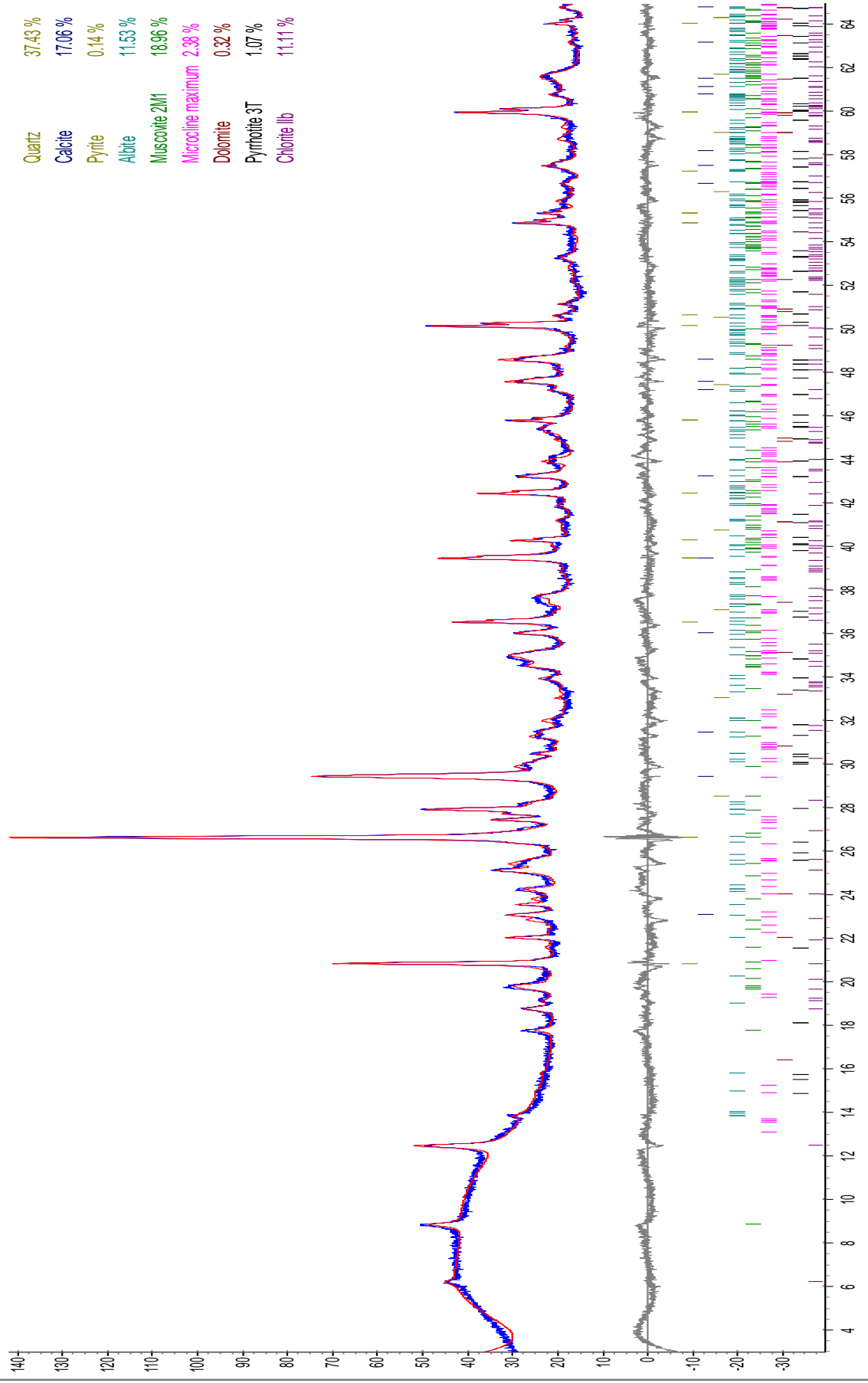
C Diffraktogram

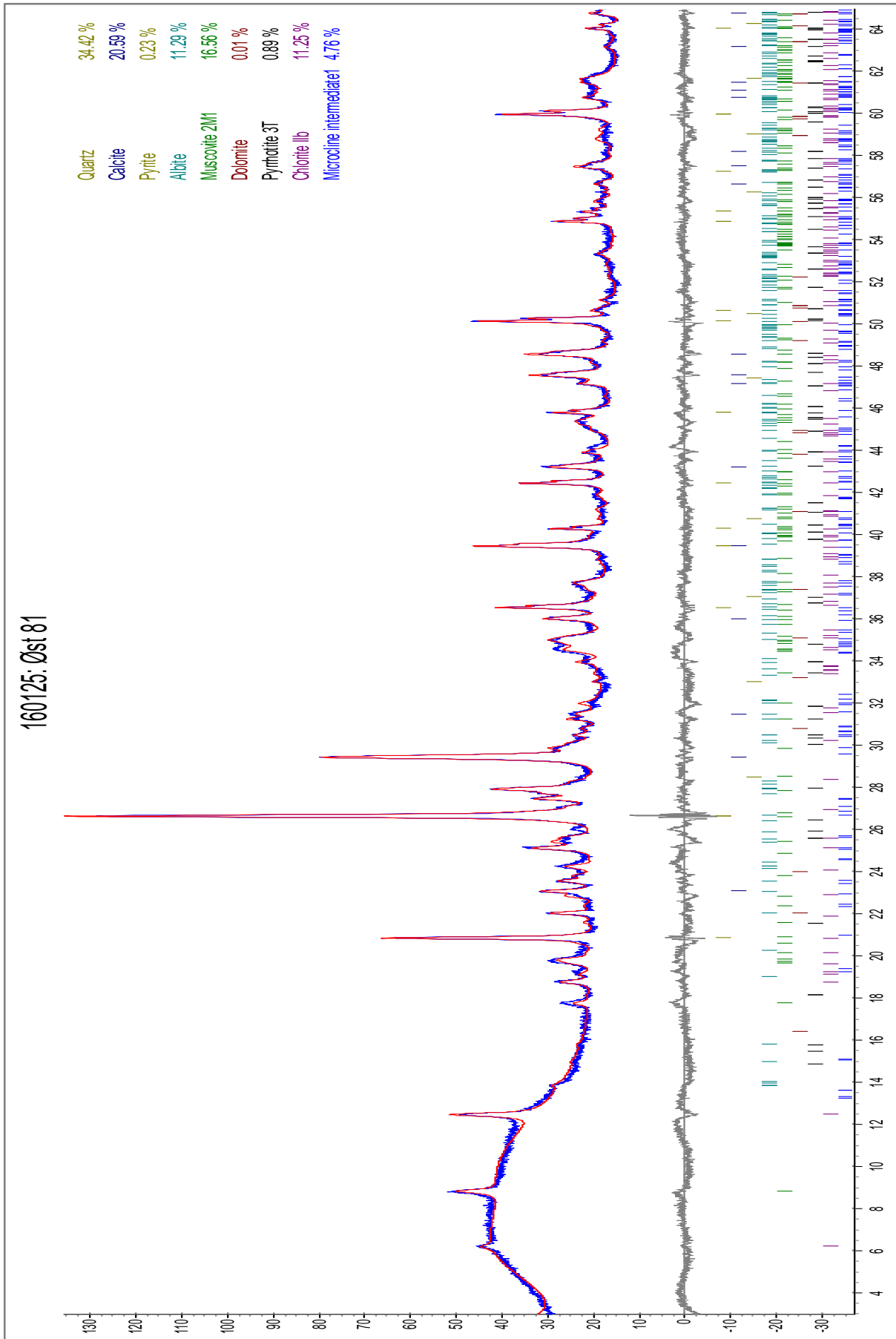
C1 Brønn øst



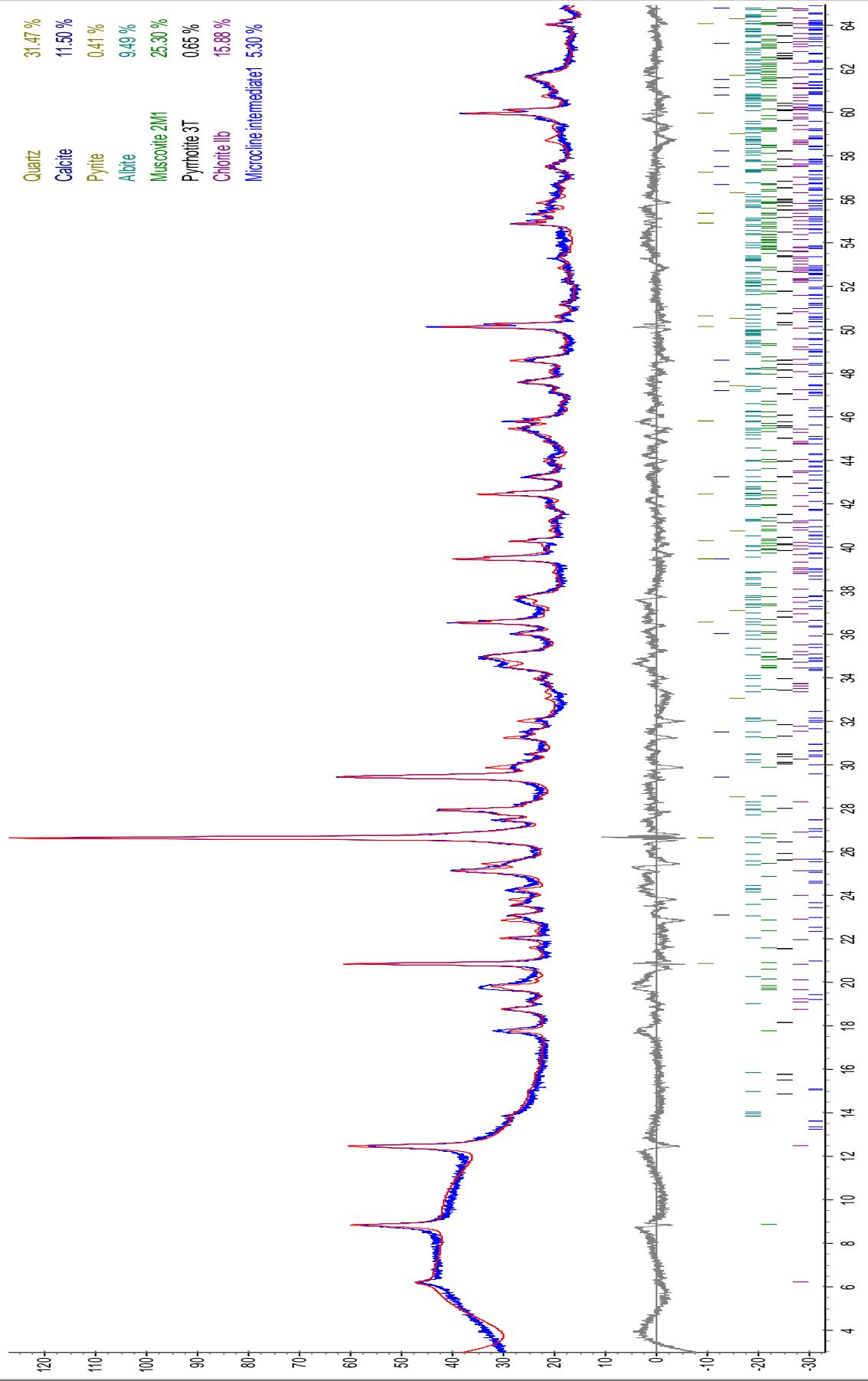


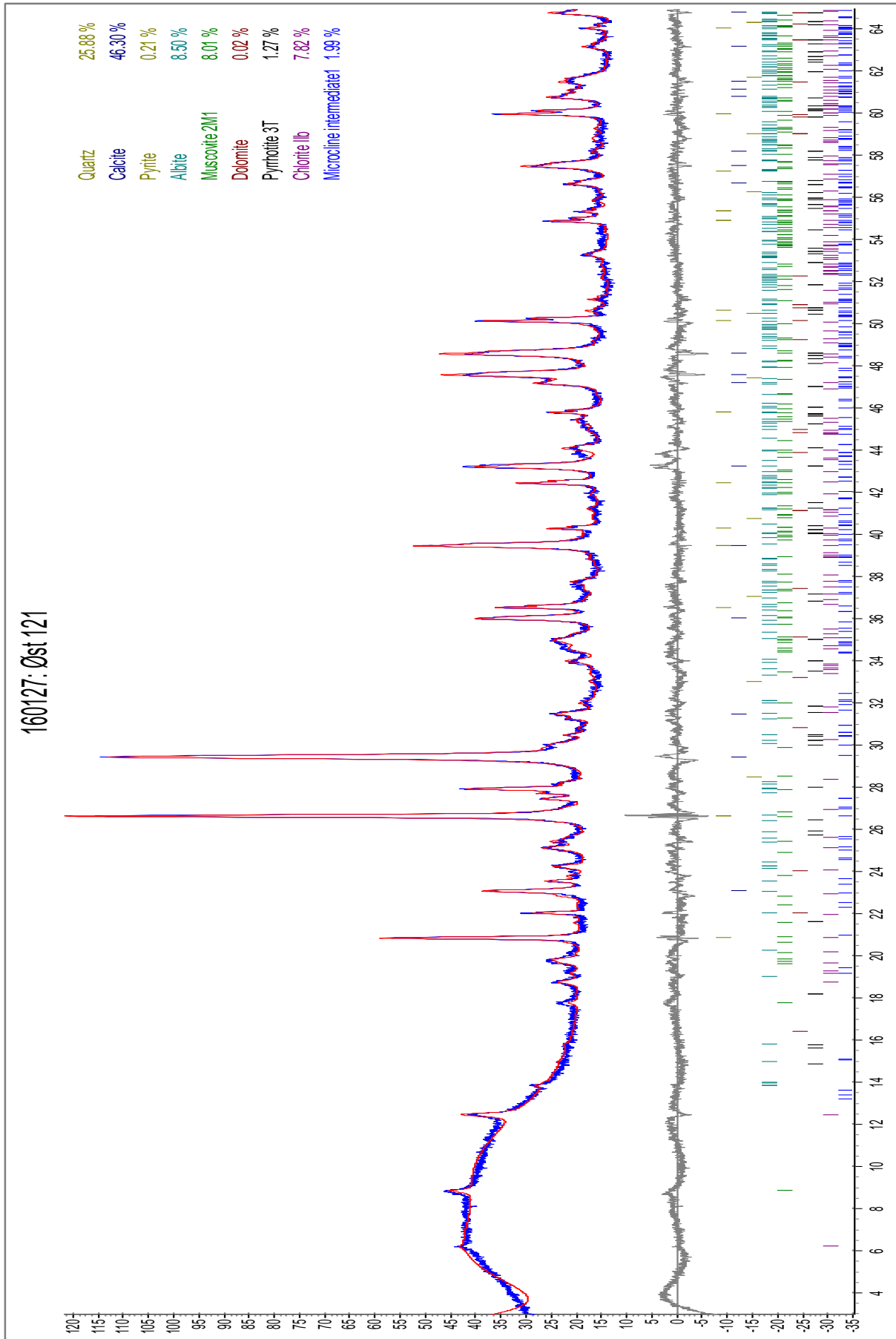
160124: Øst 61



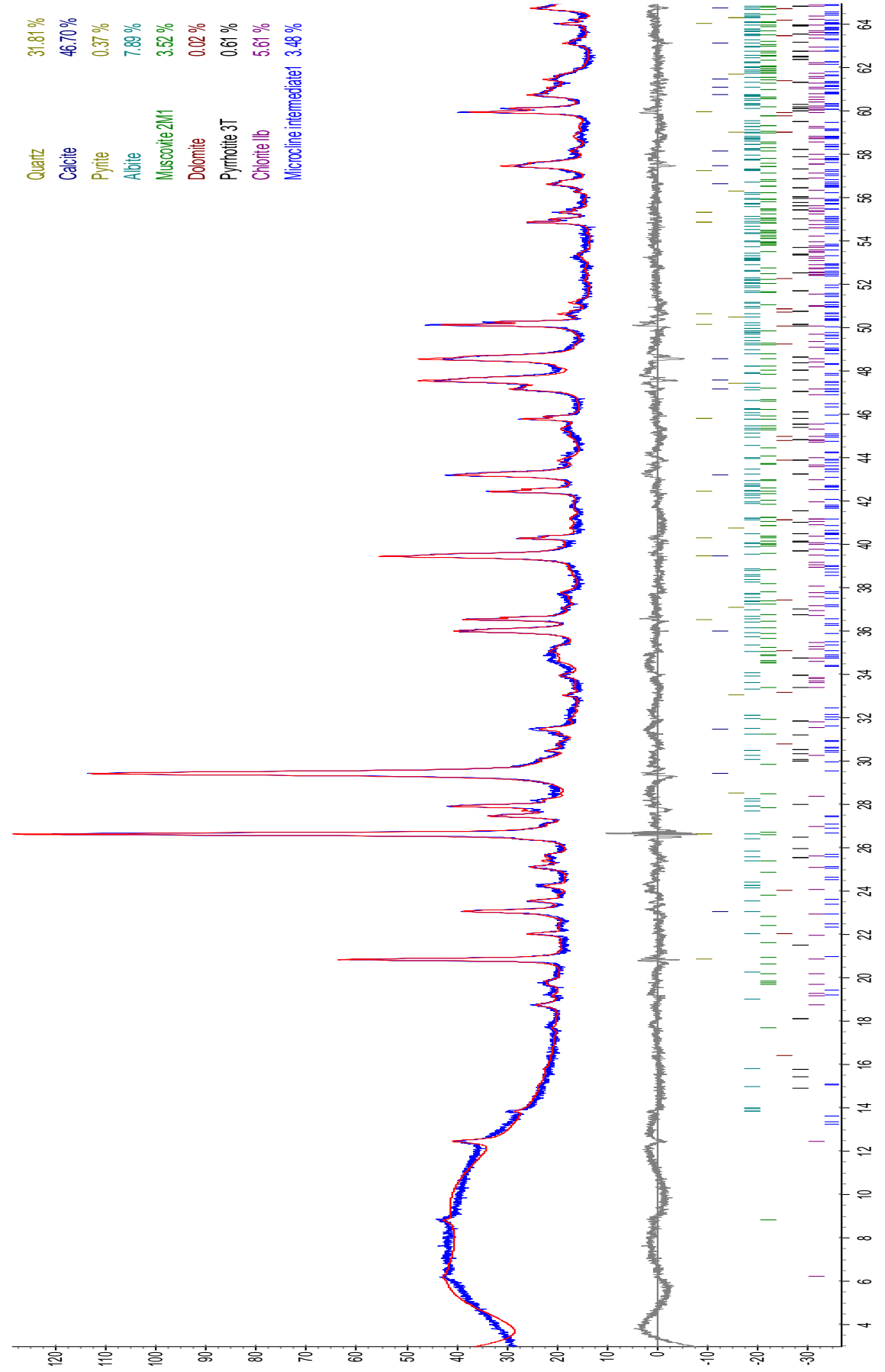


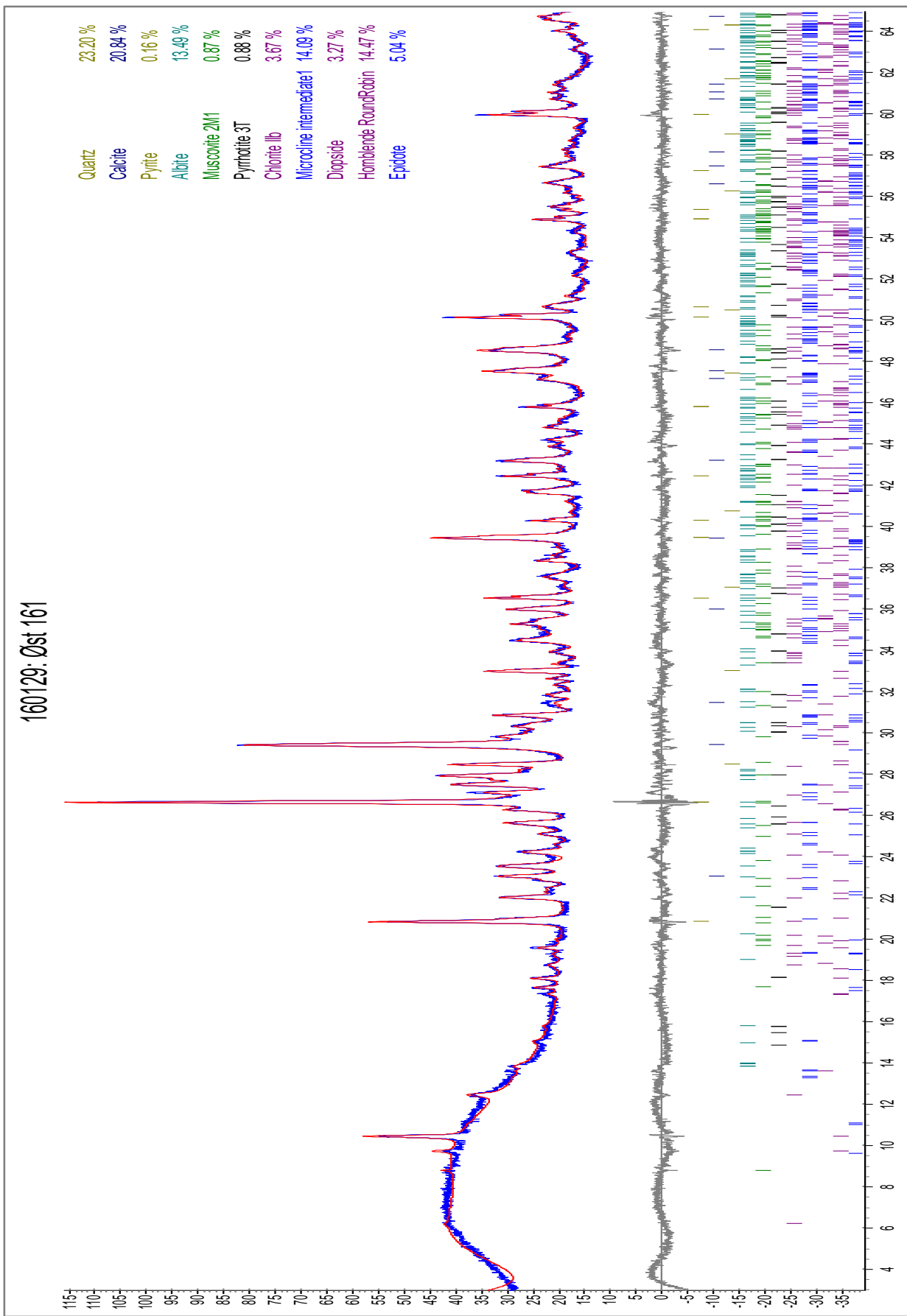
160126: Øst 101



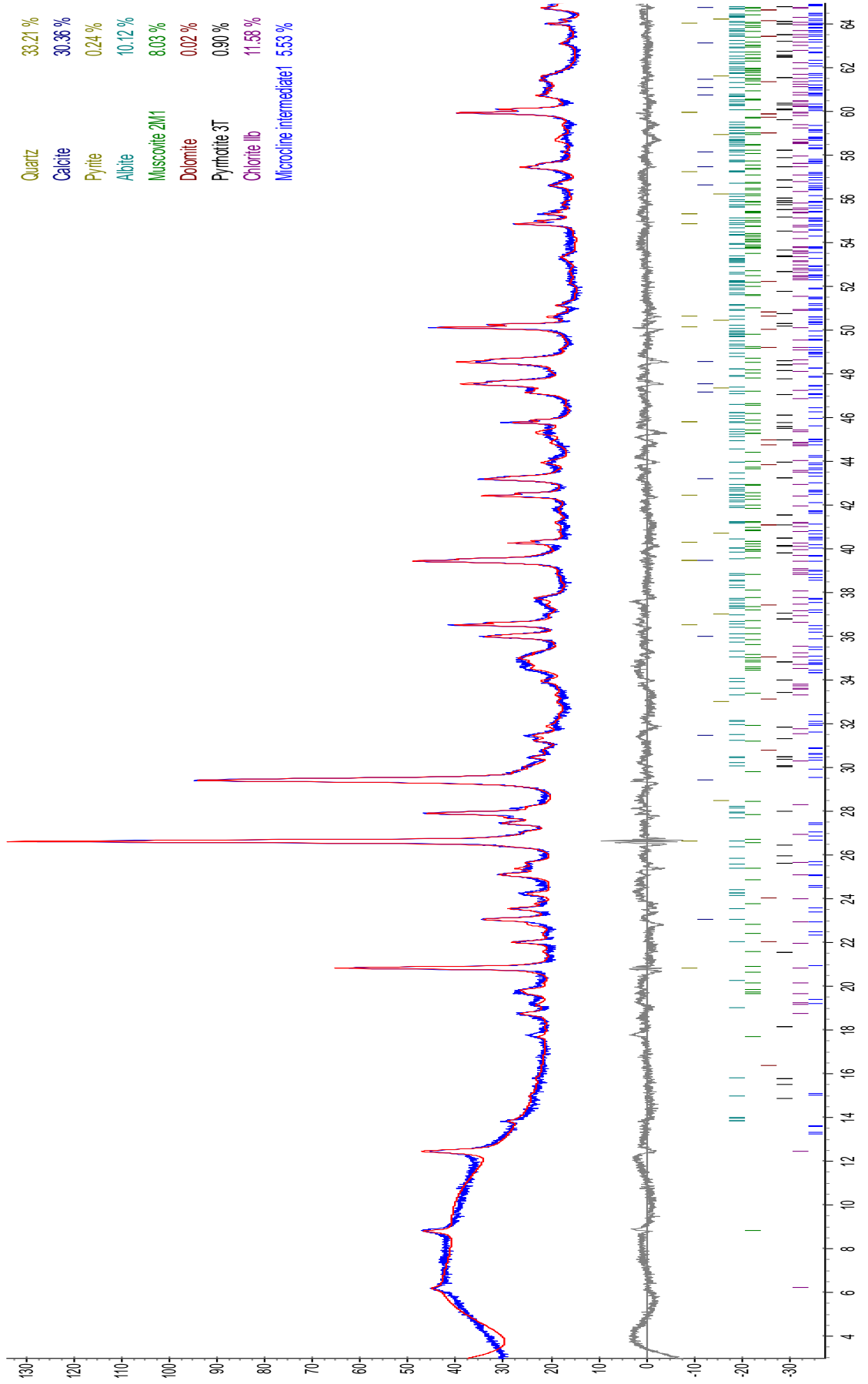


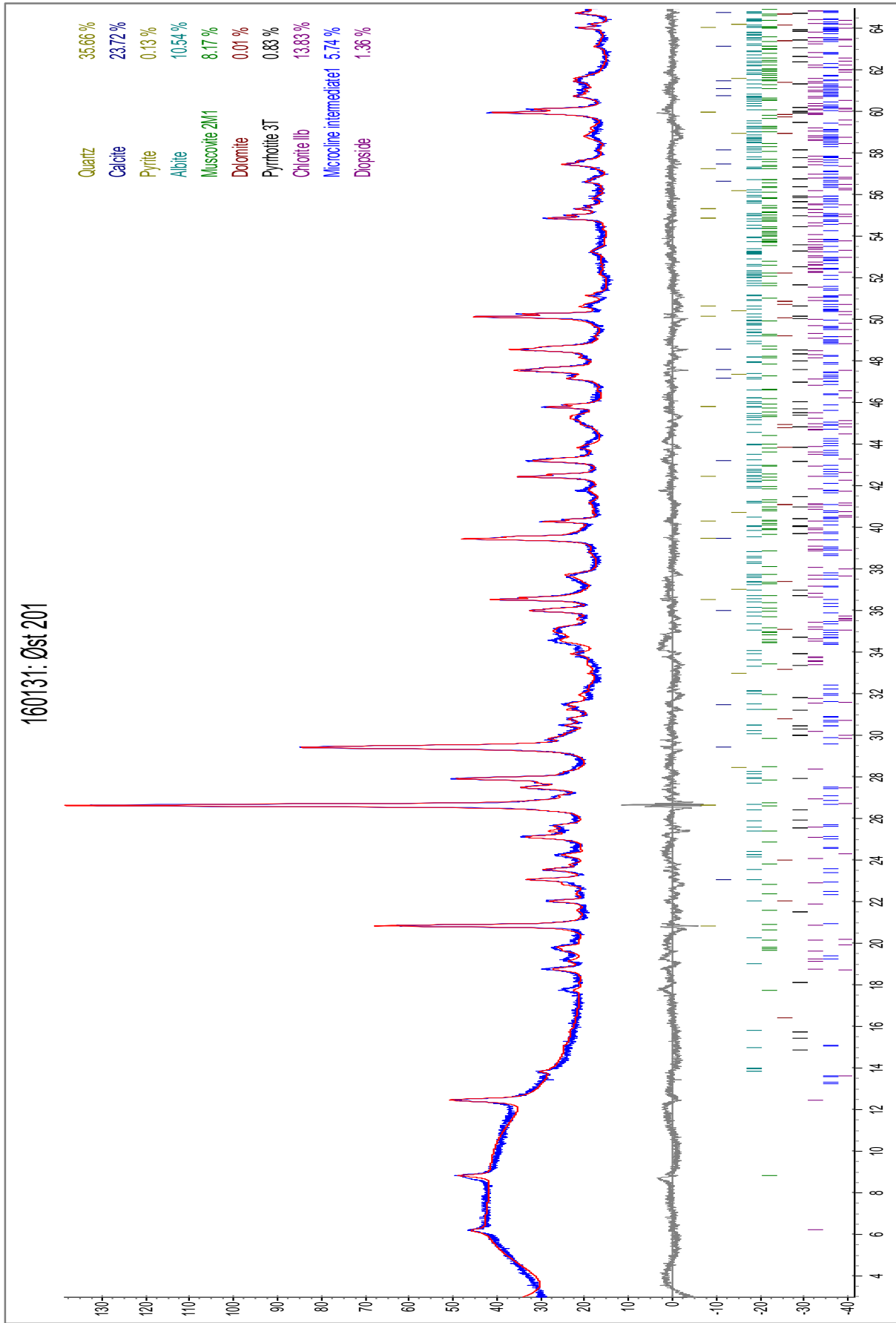
160128: Øst 141

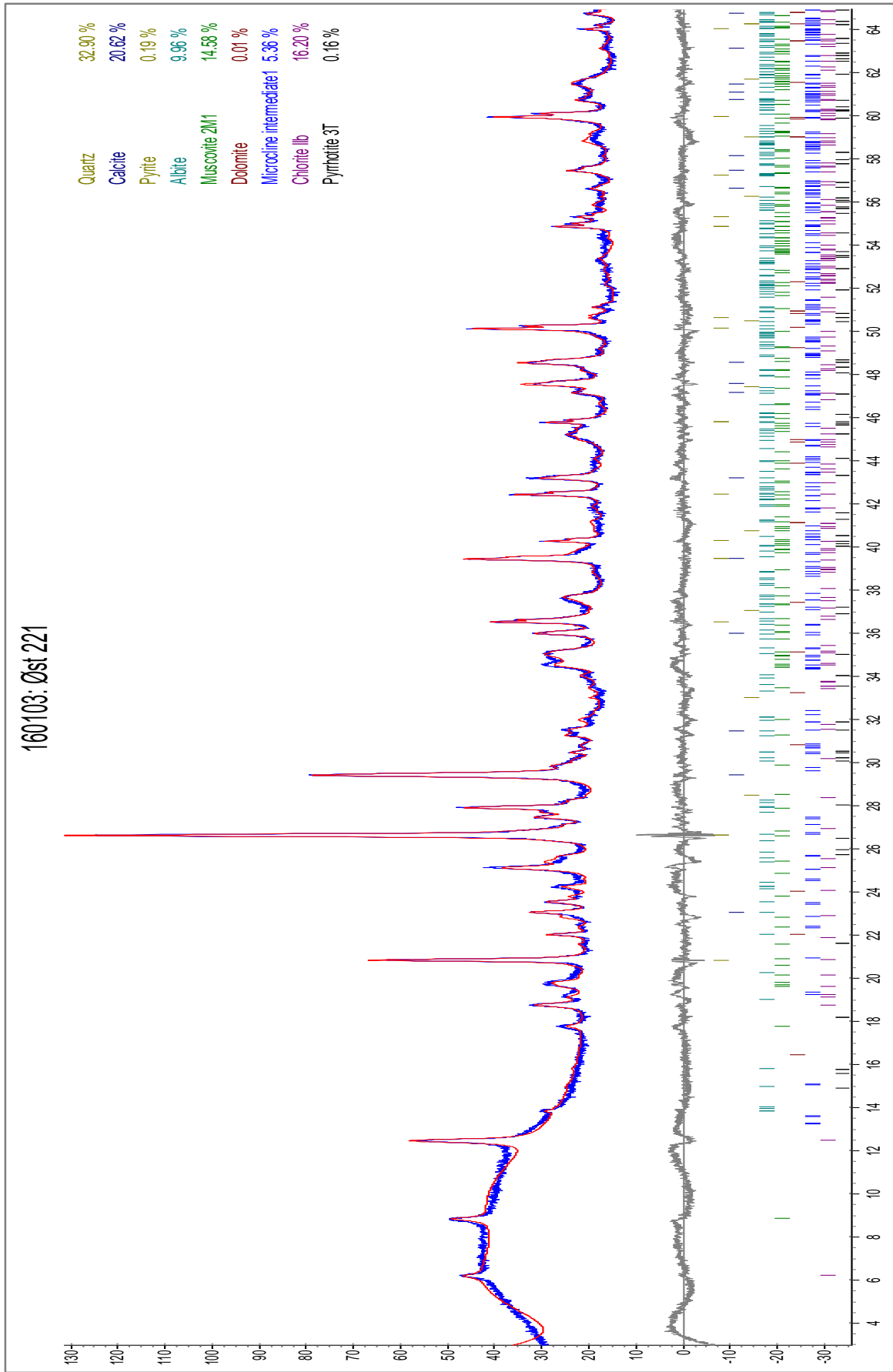


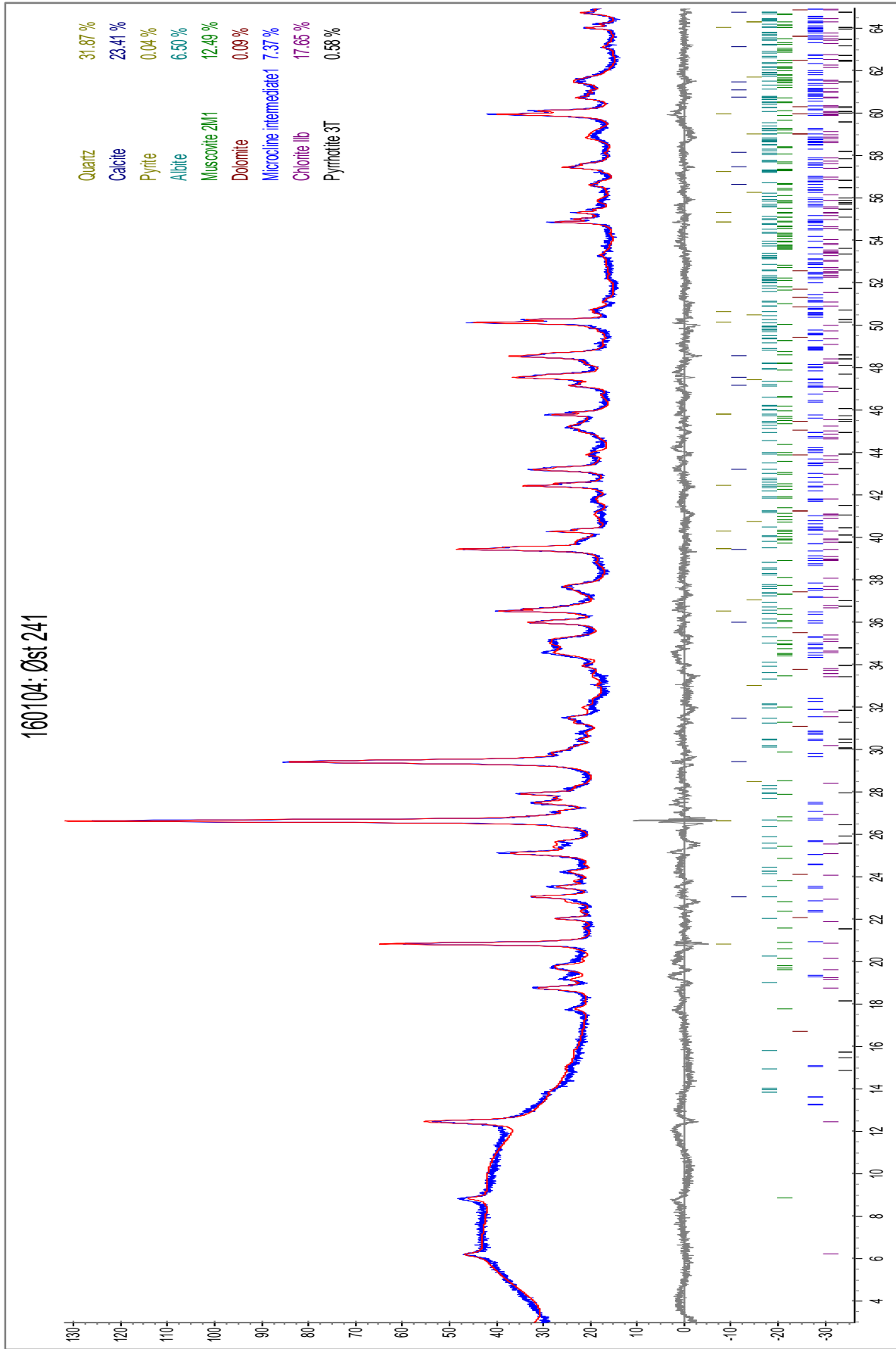


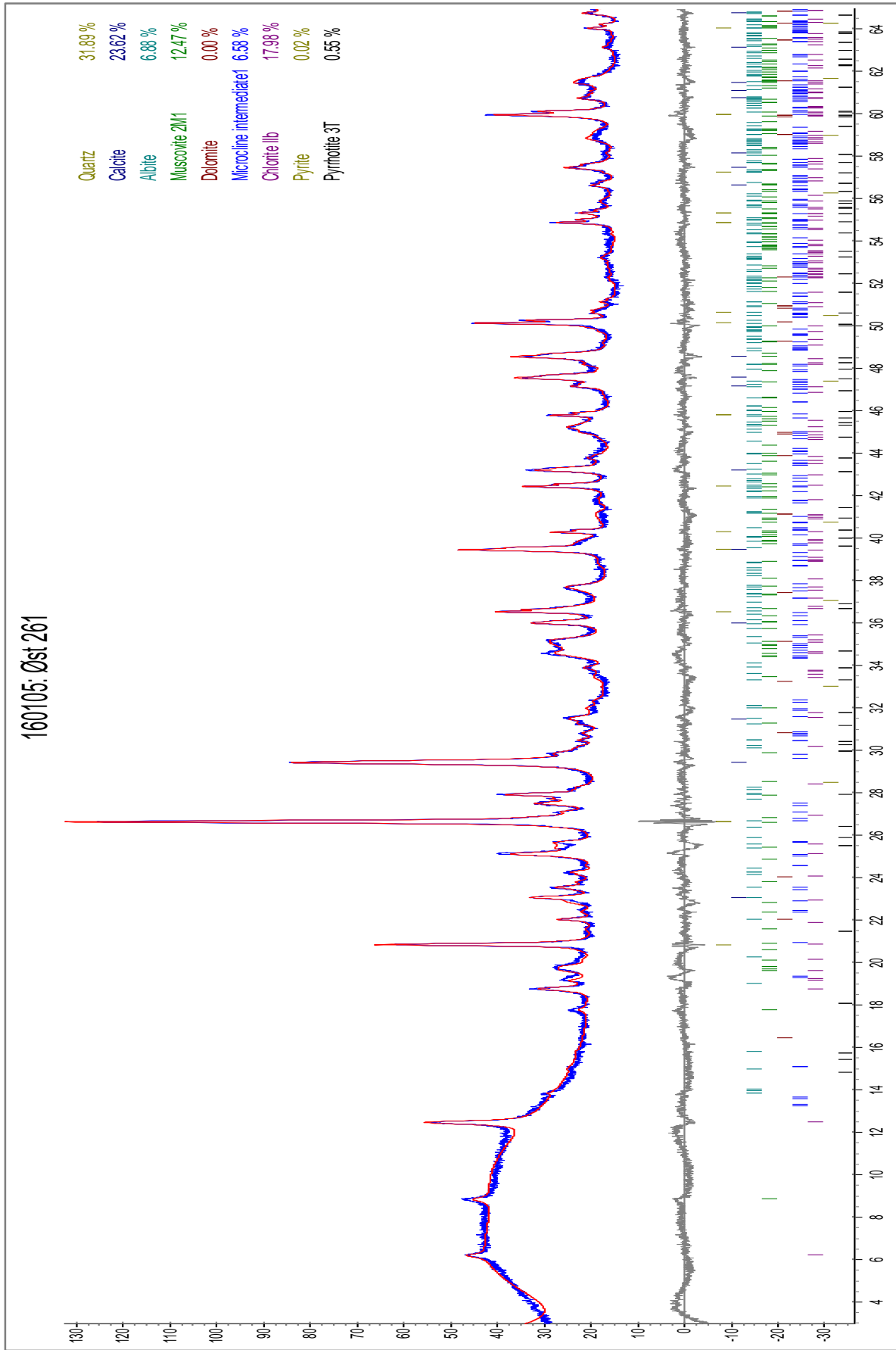
160130: Øst 181



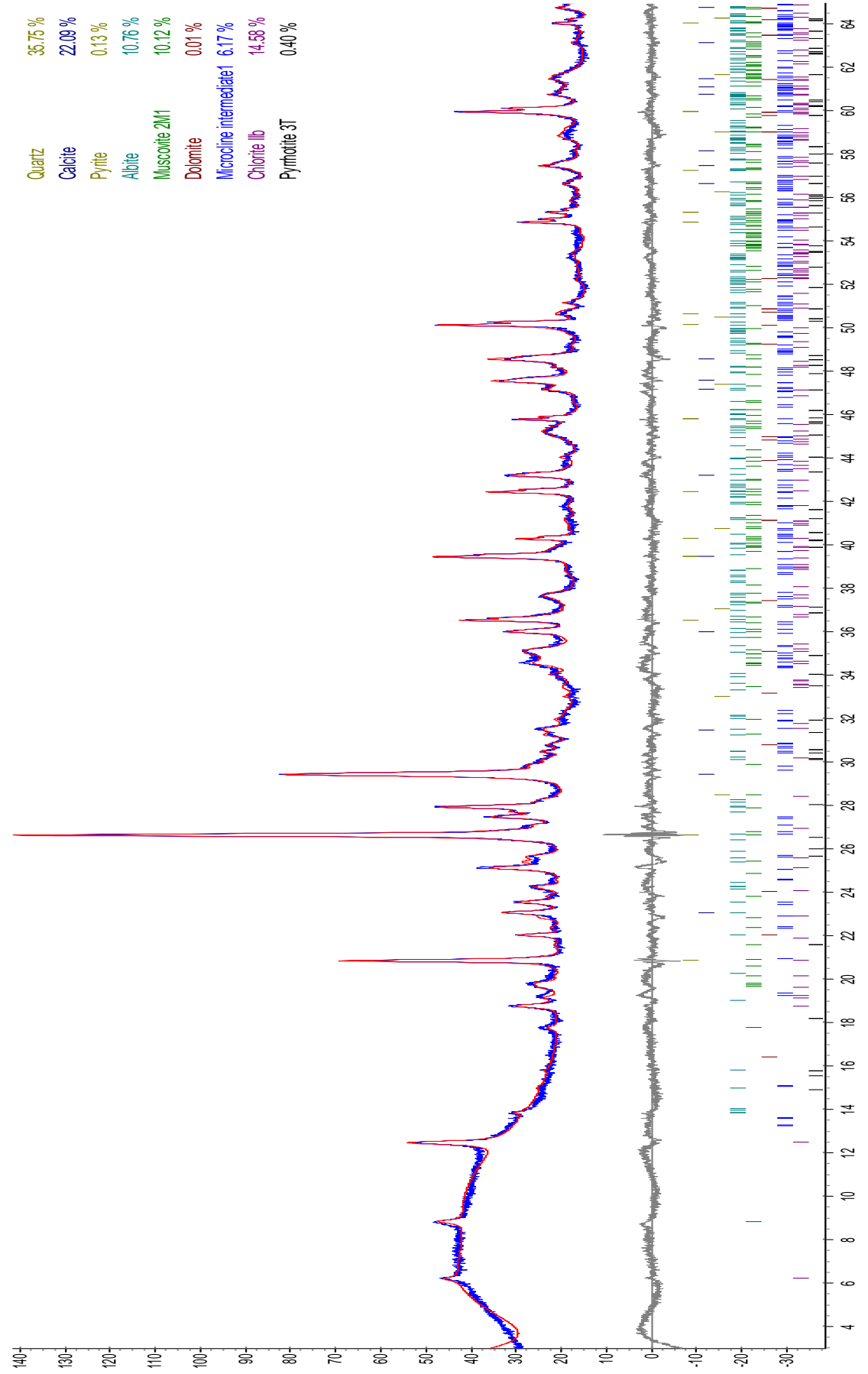


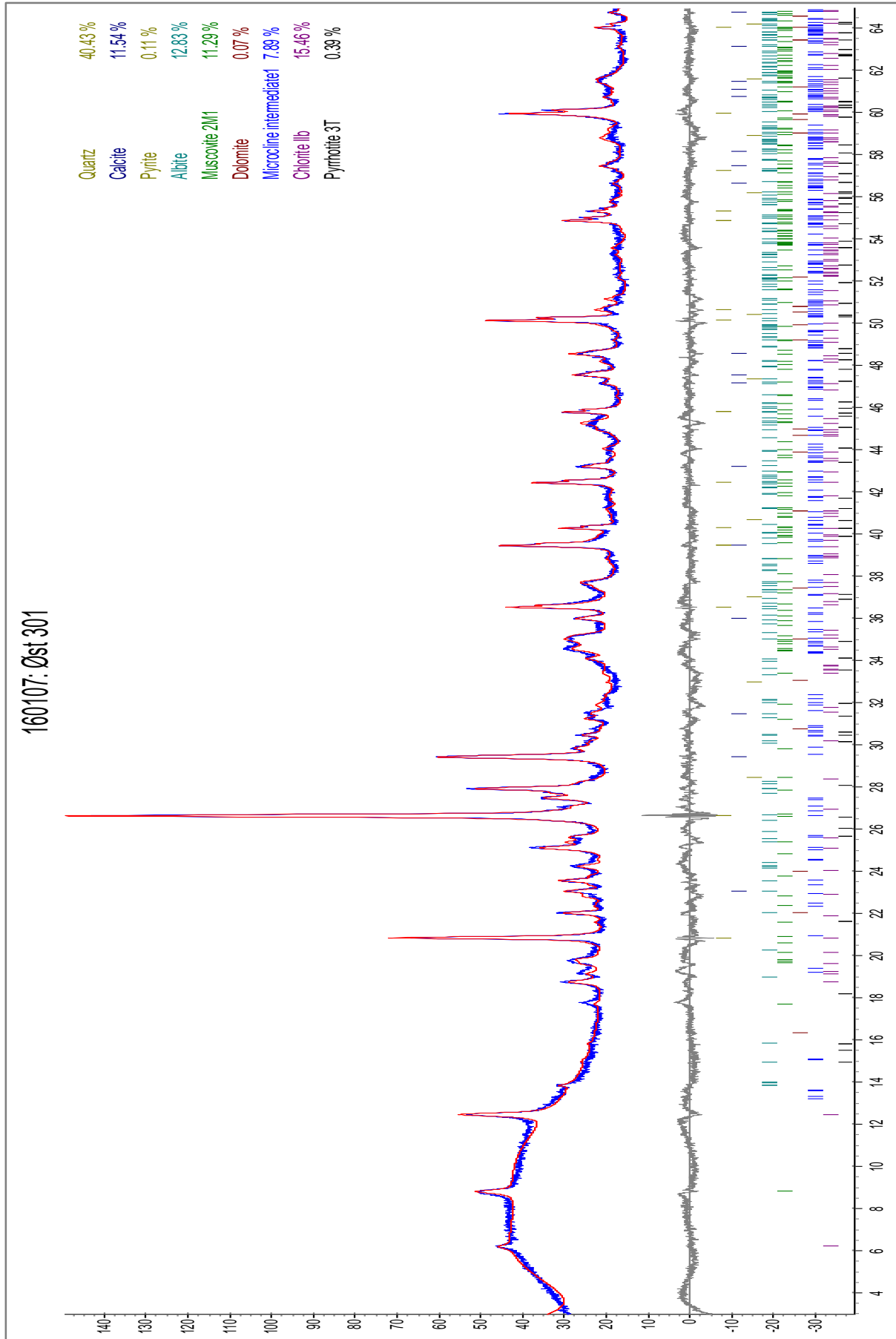




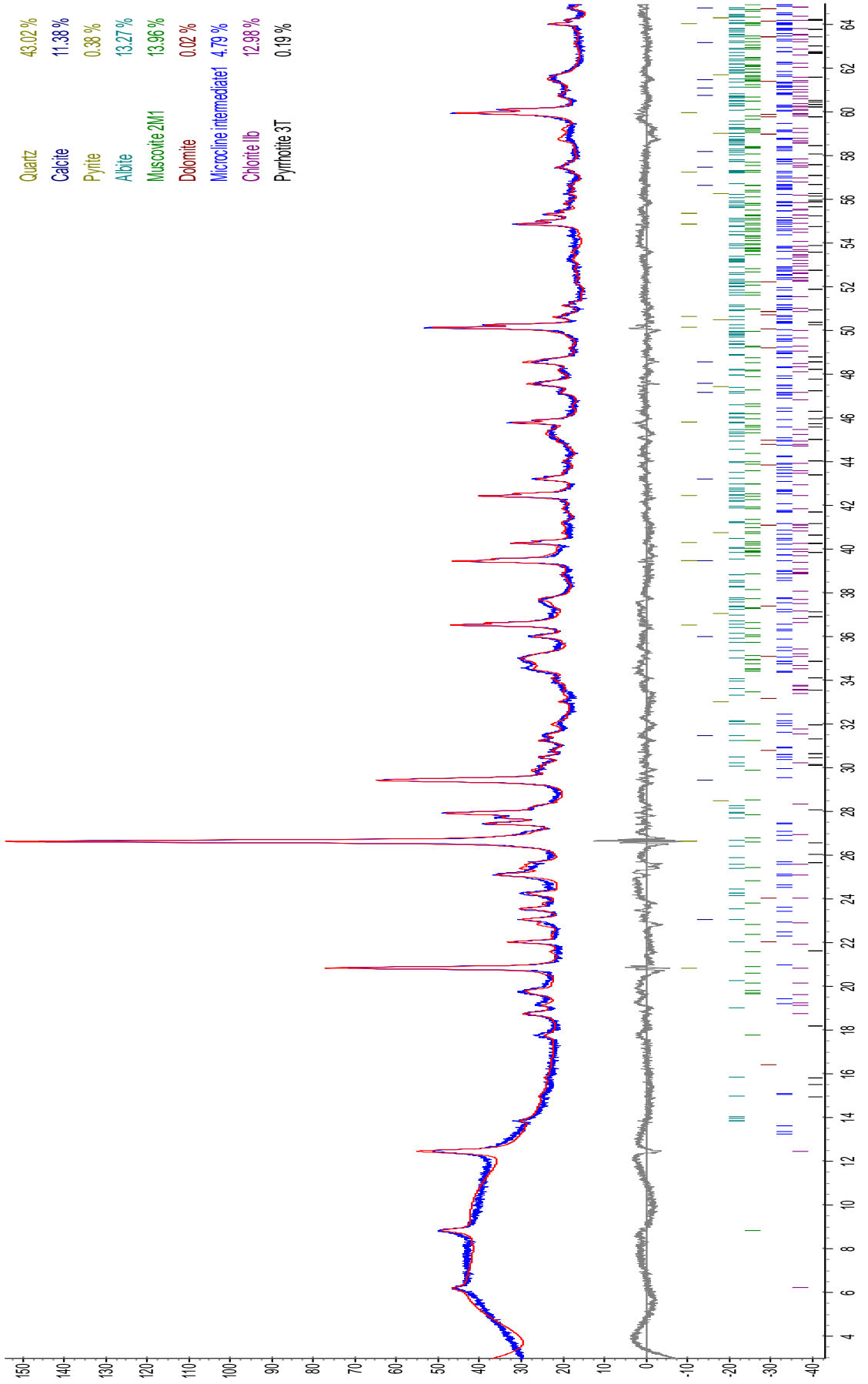


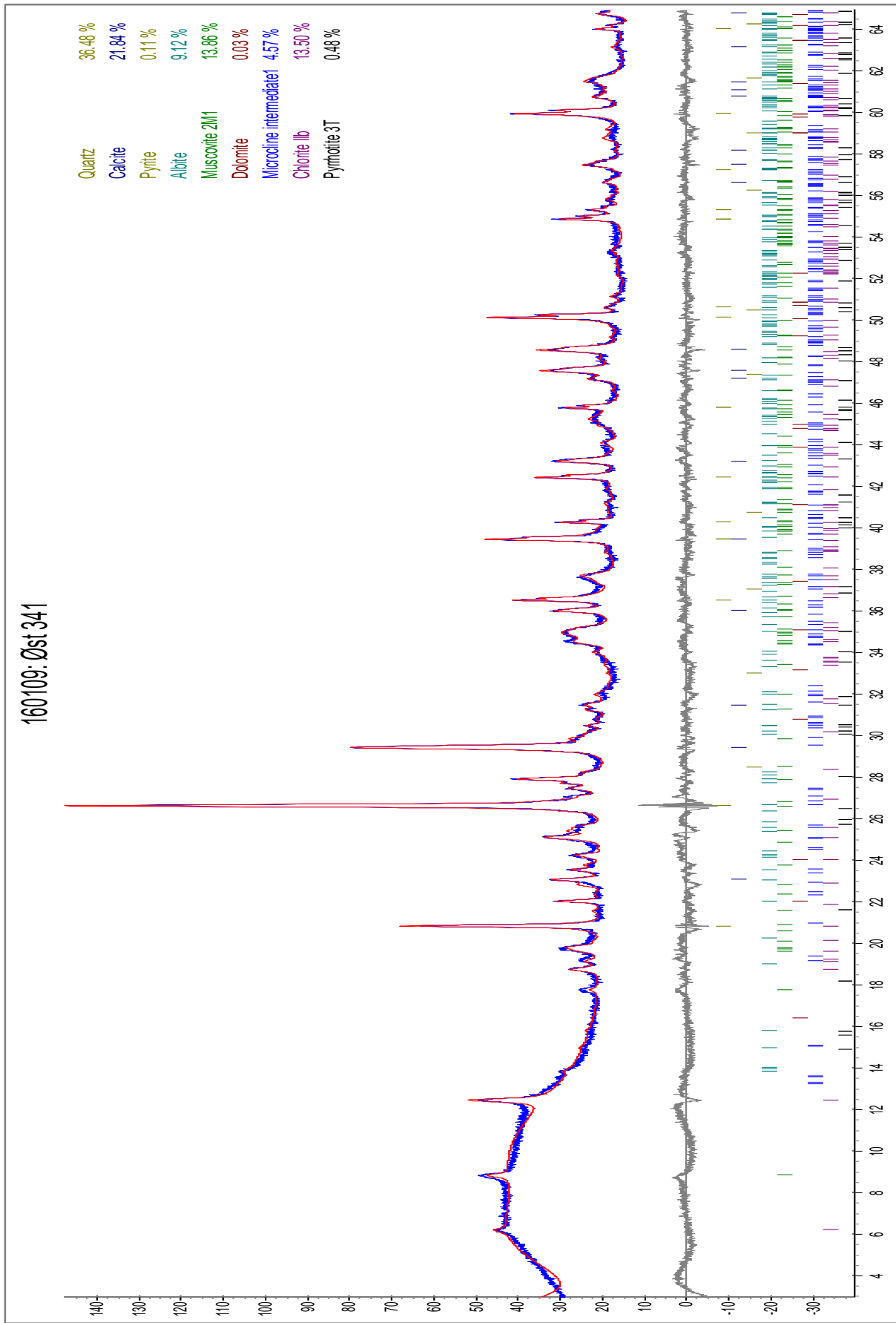
160106: Øst 281

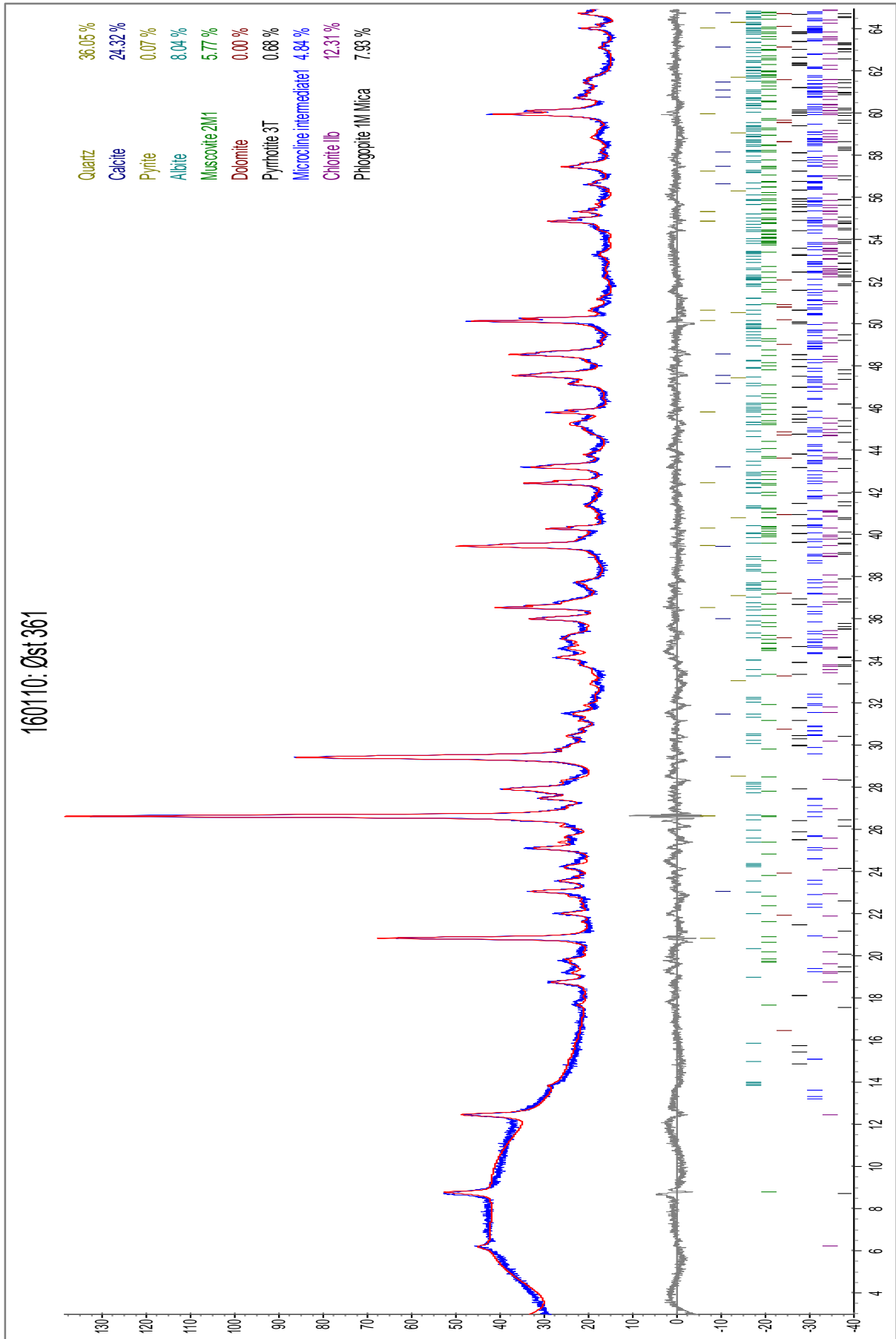


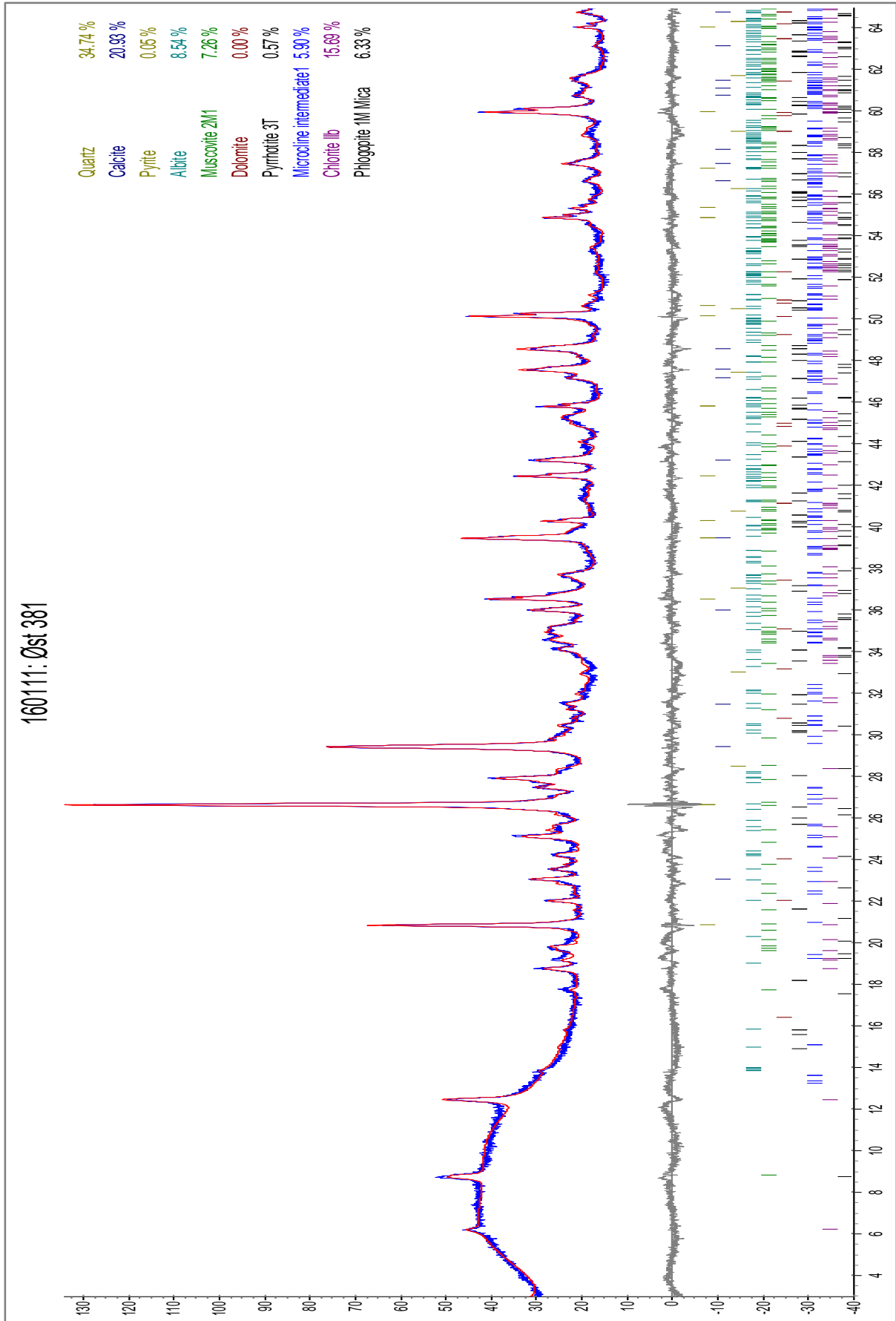


160108: Øst 321

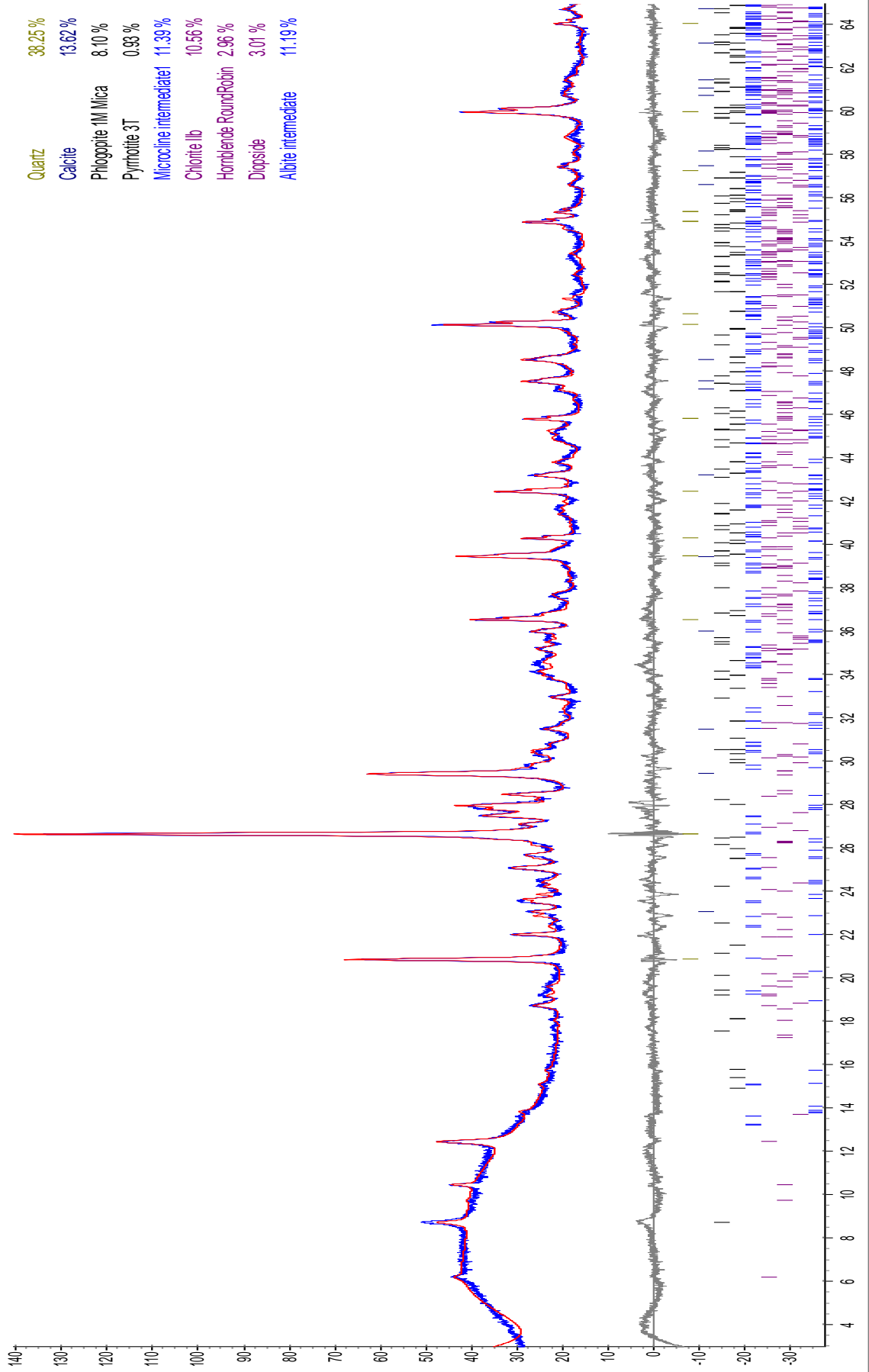




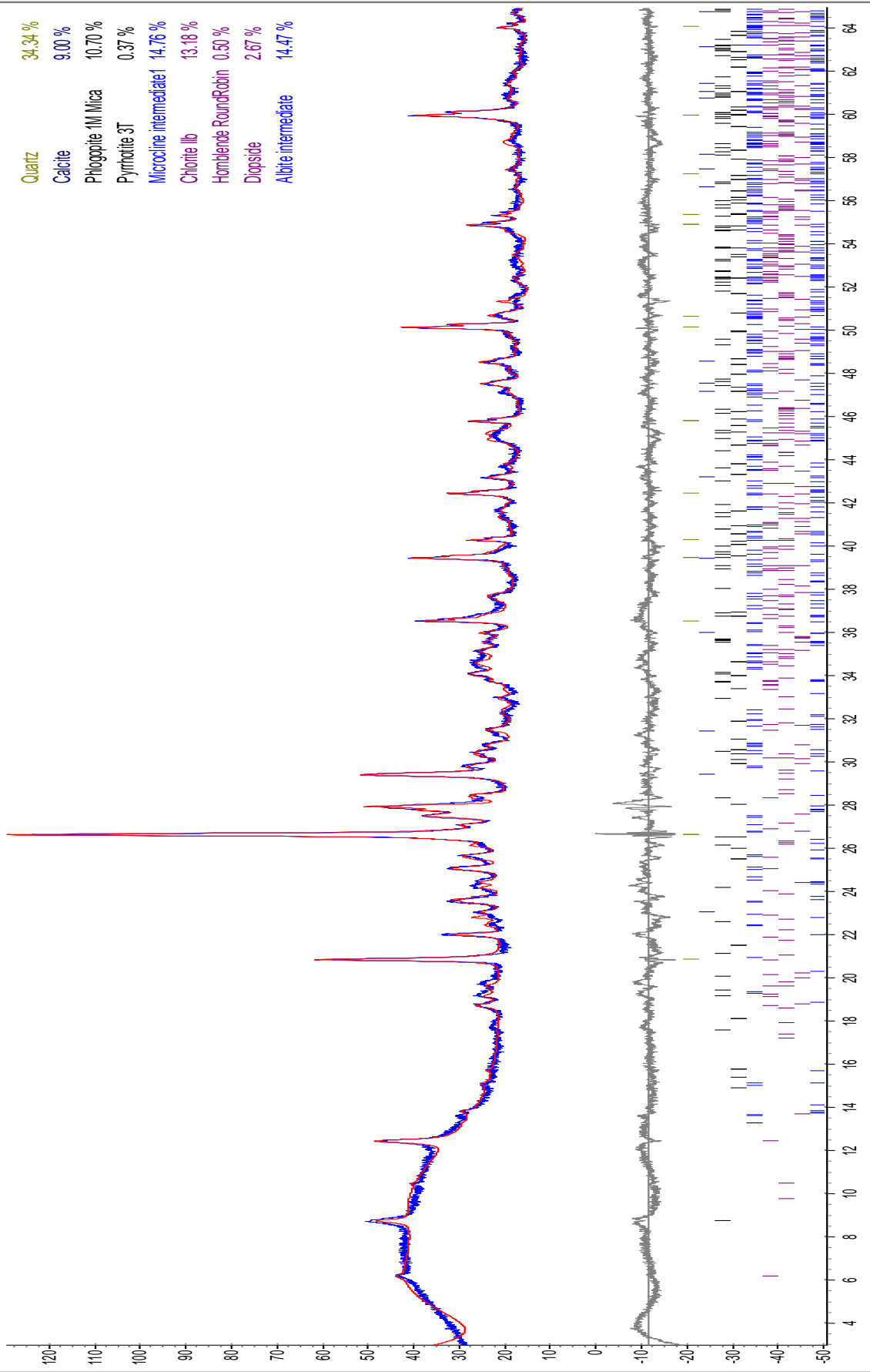




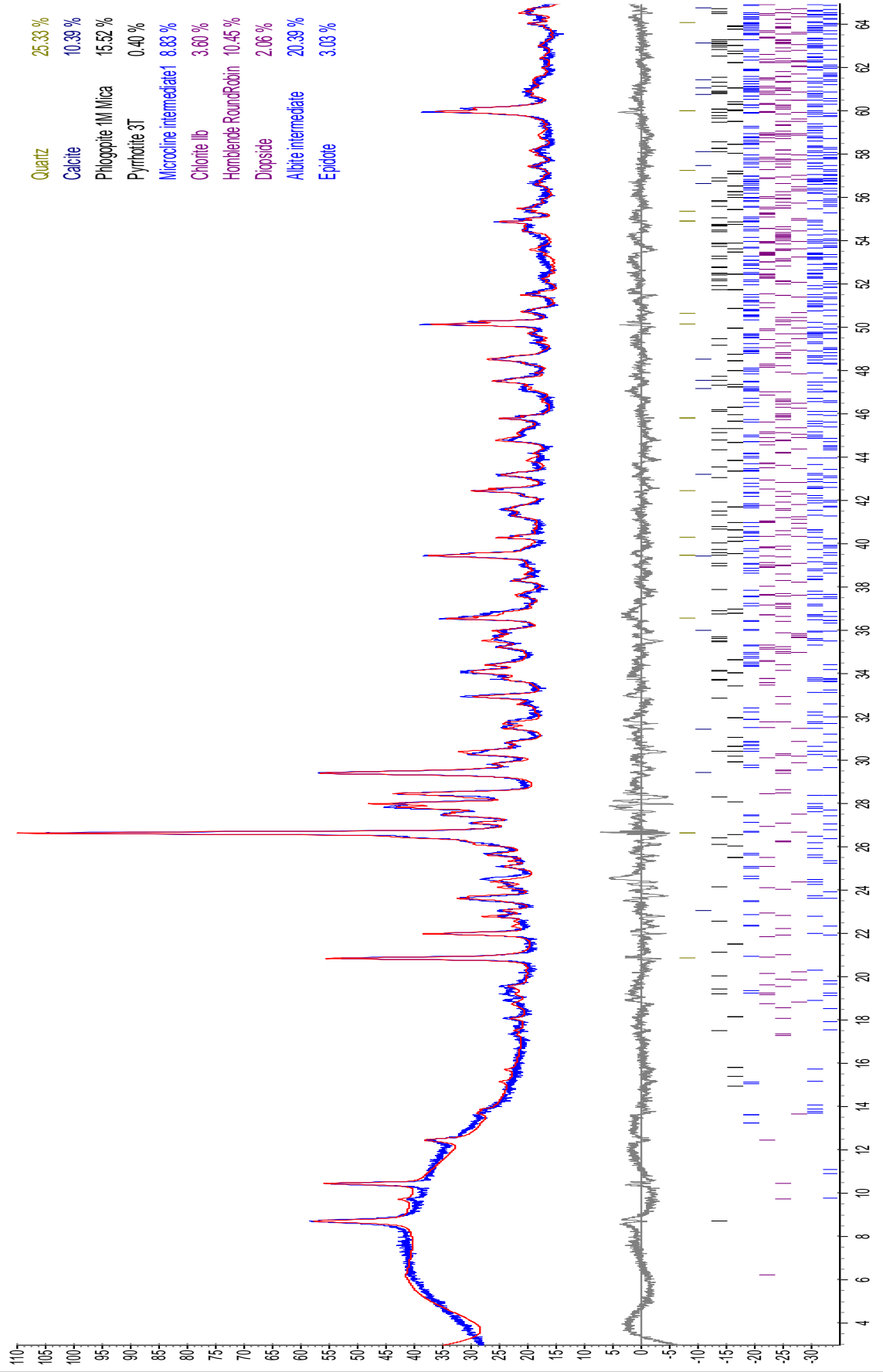
160215: Øst 401



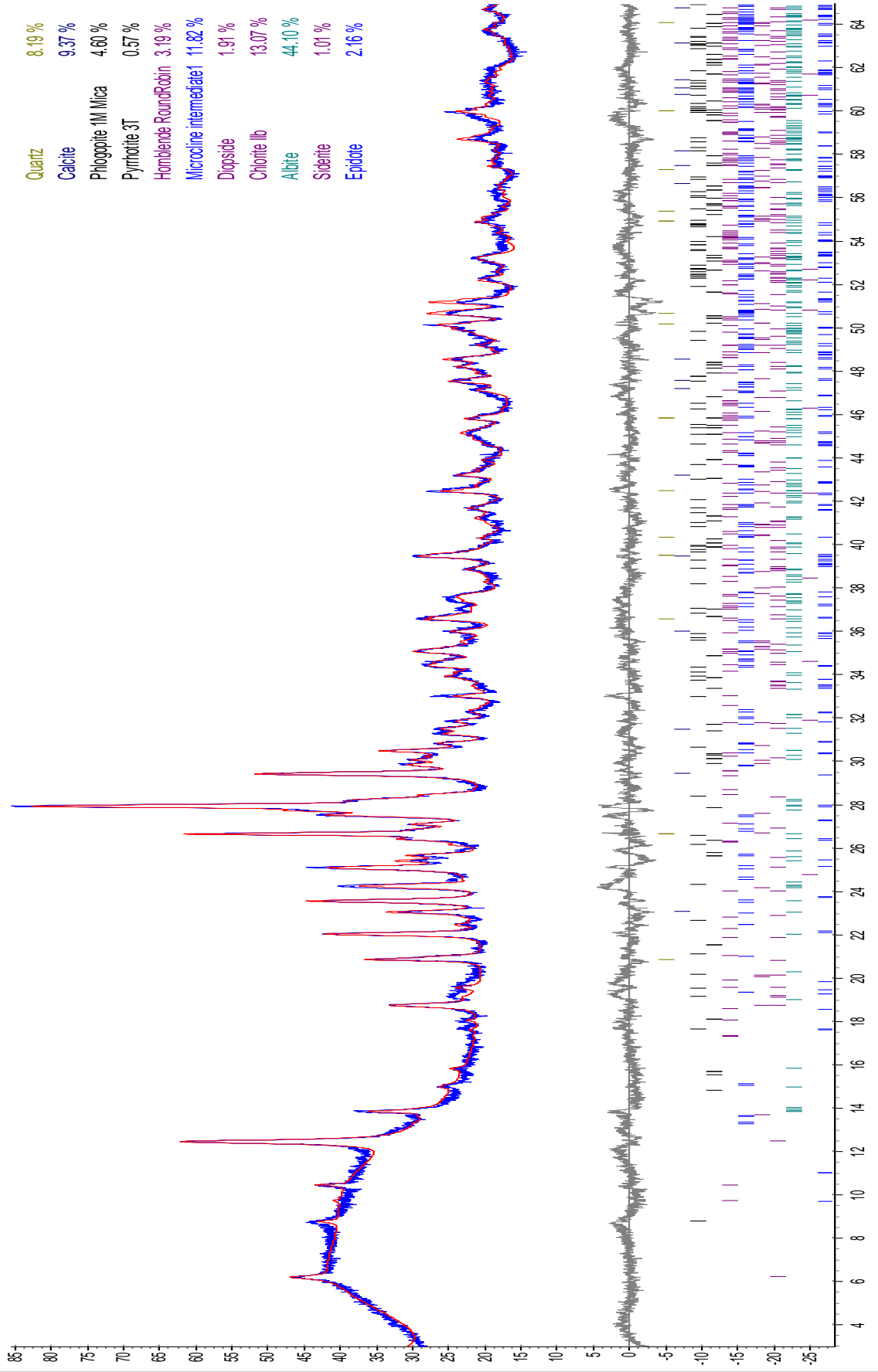
160216: Øst 421



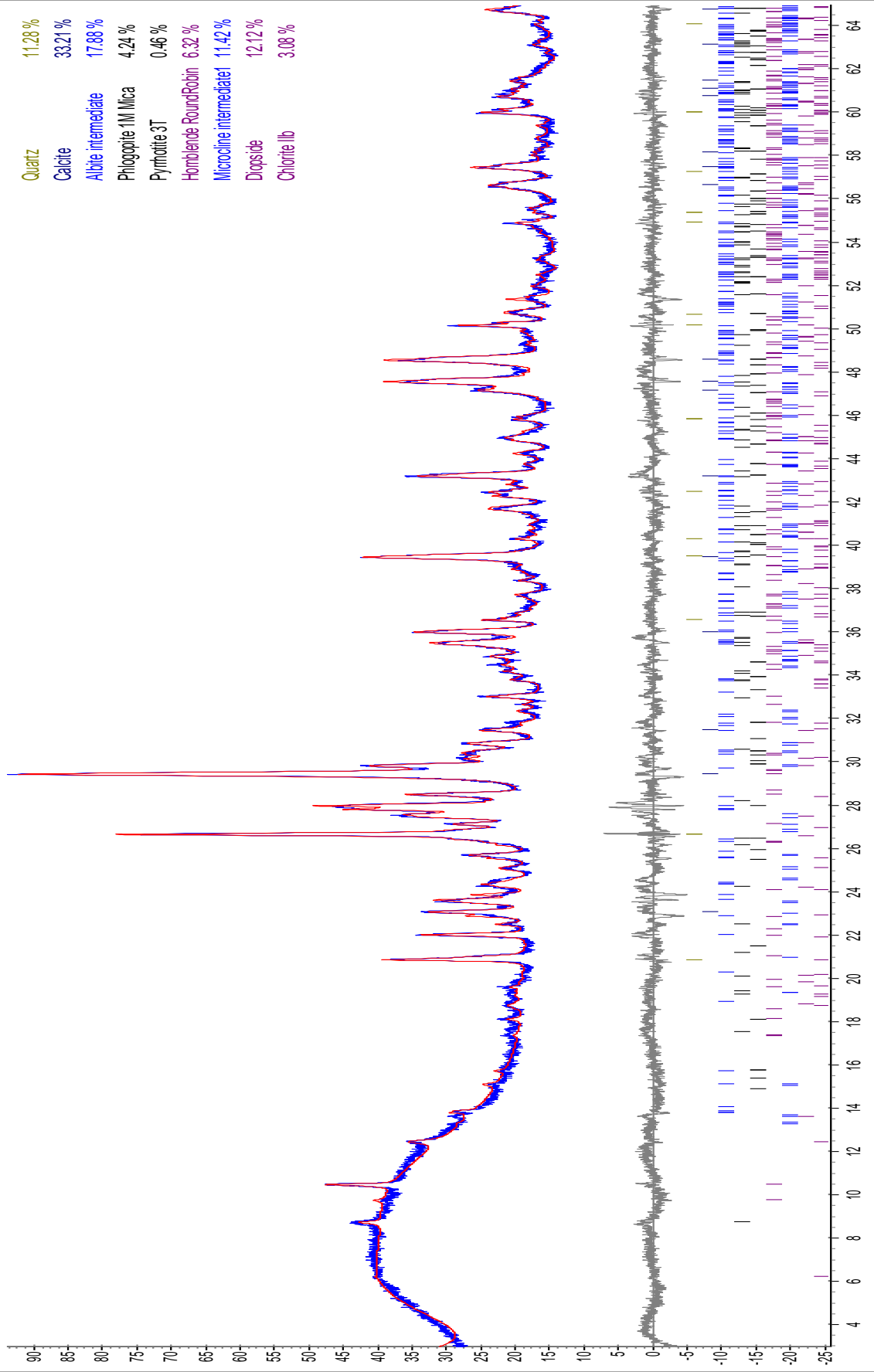
160217: Øst 441



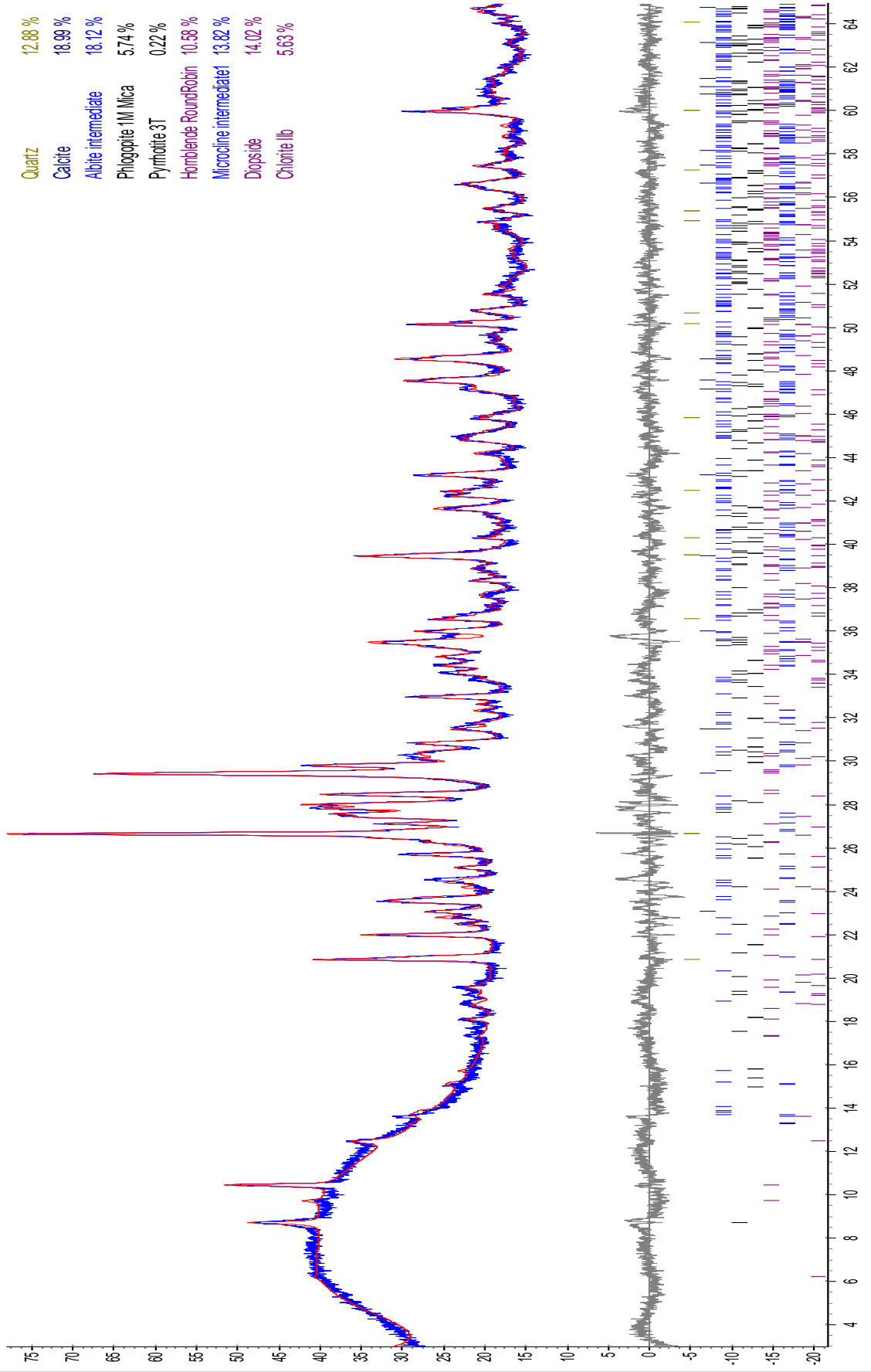
160218: Øst 461



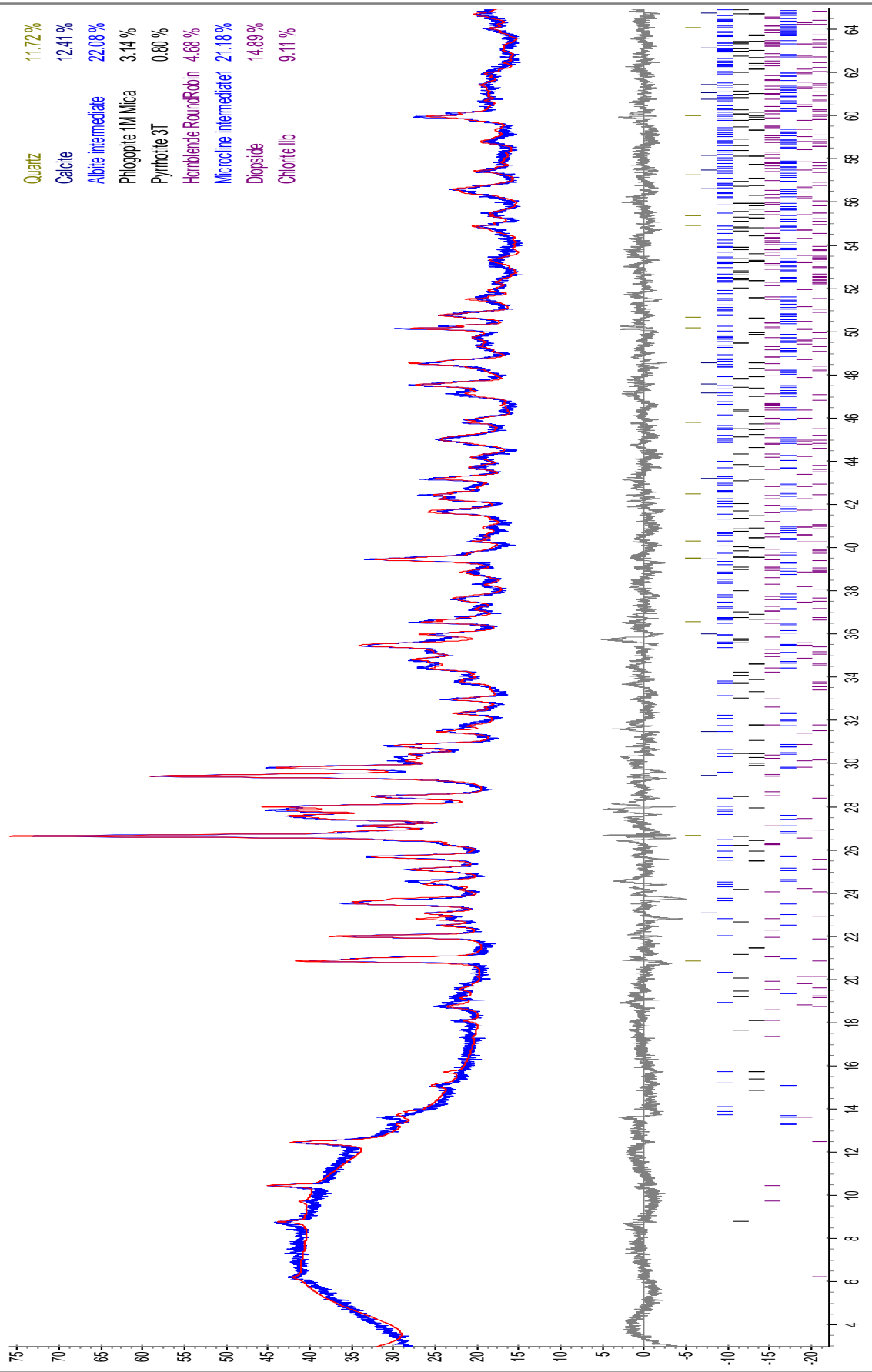
160219: Øst 481



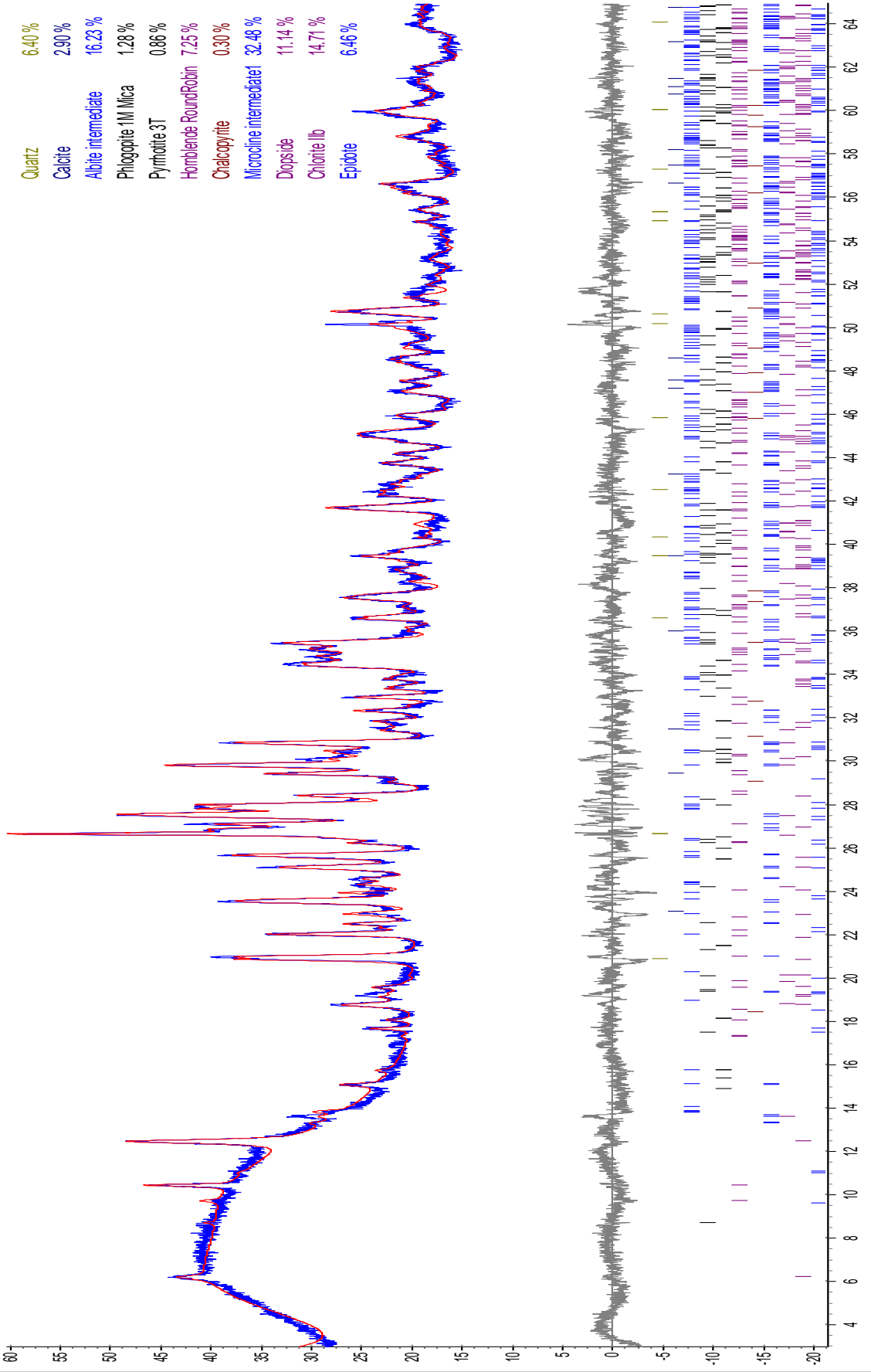
160220: Øst 501



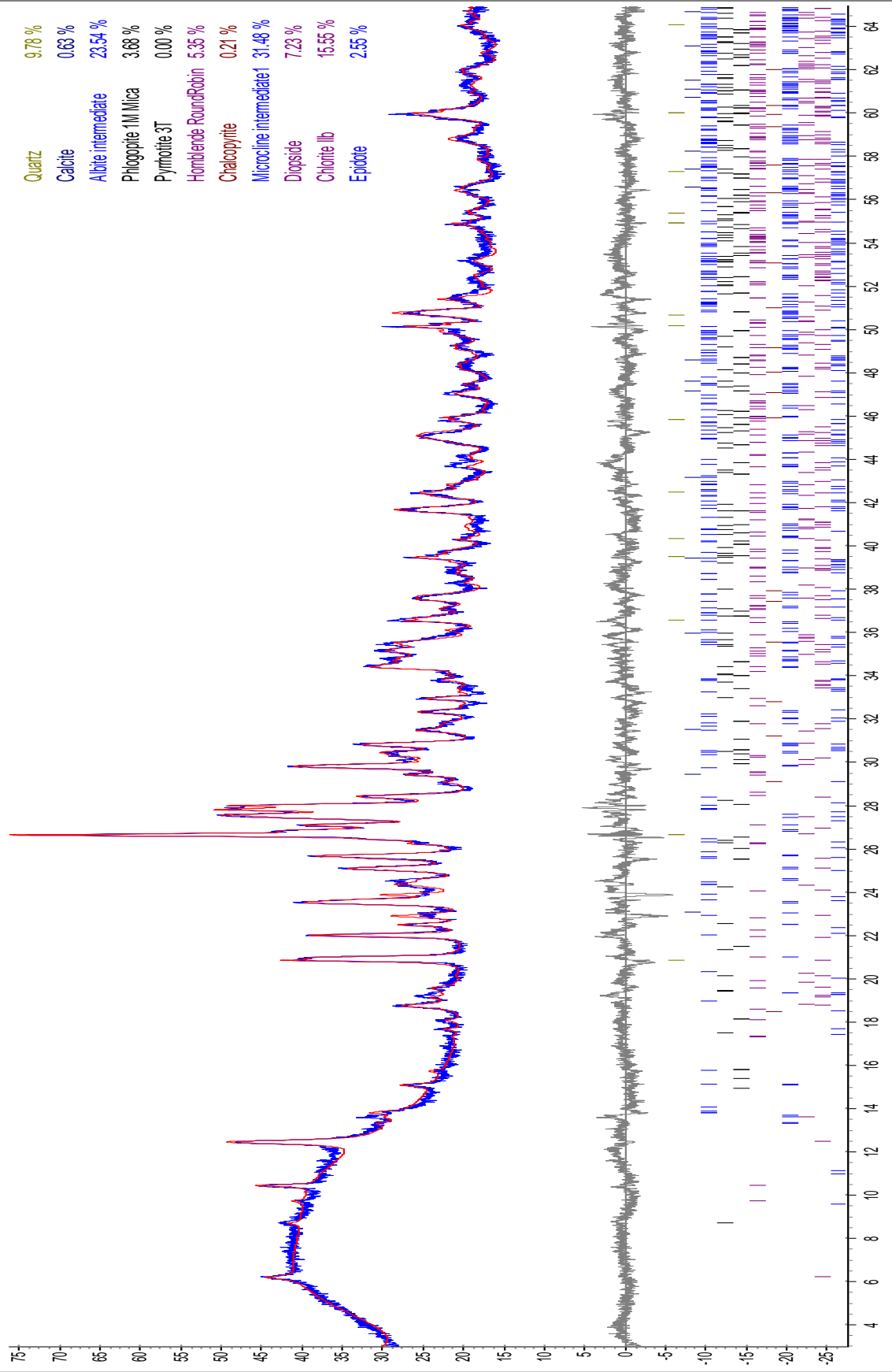
160221: Øst 521



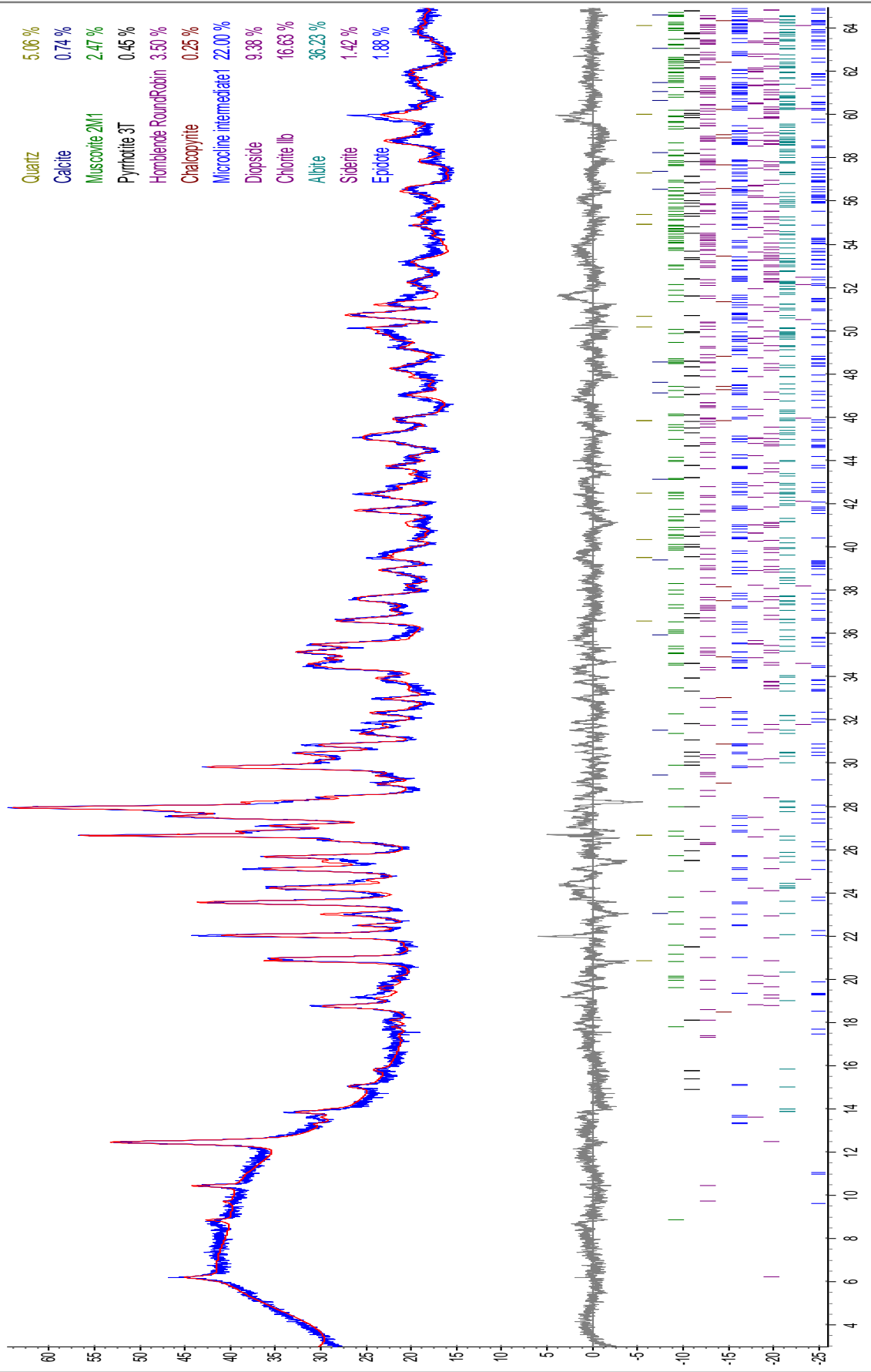
160222: Øst 541



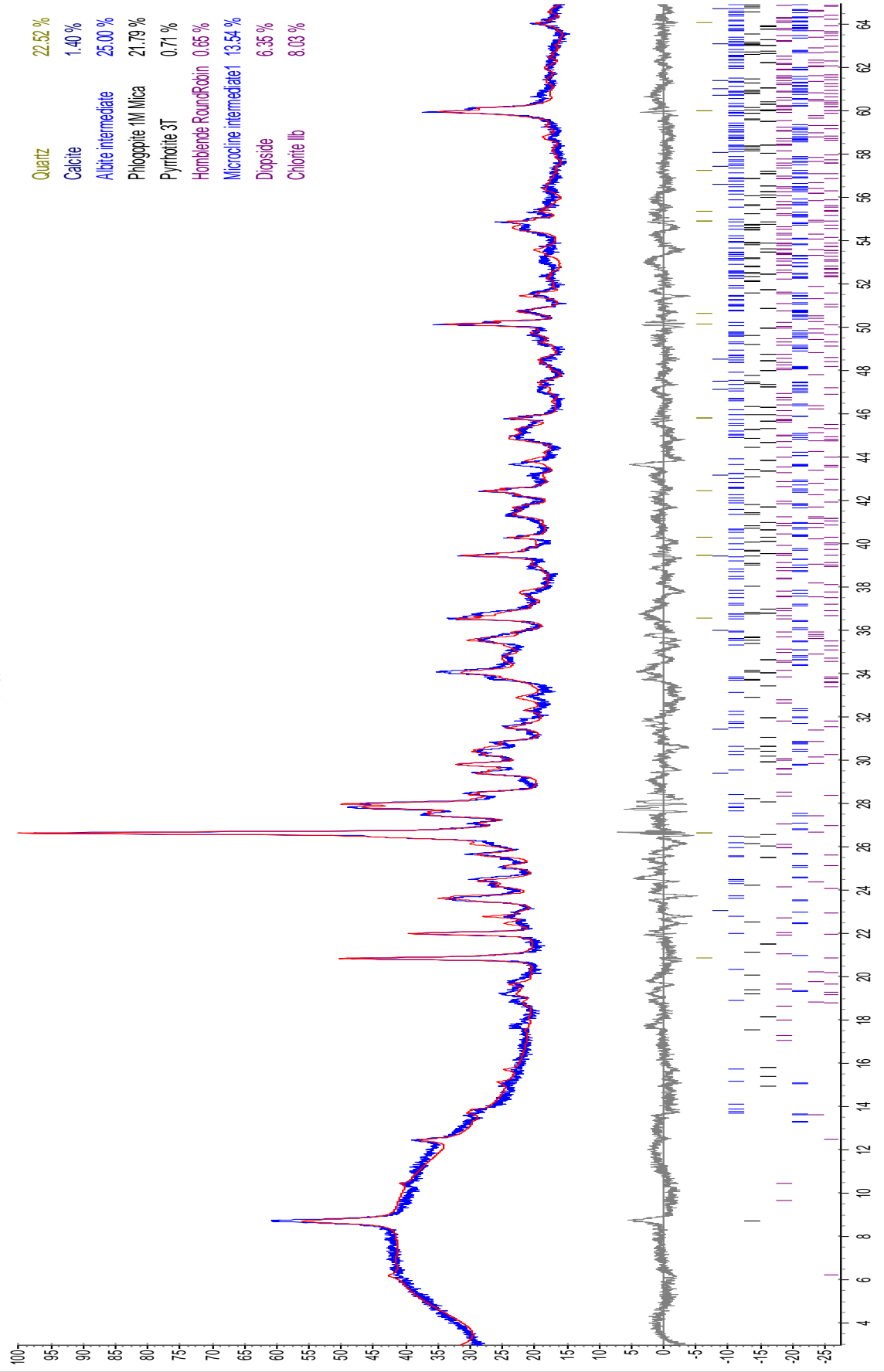
160223: Øst 561



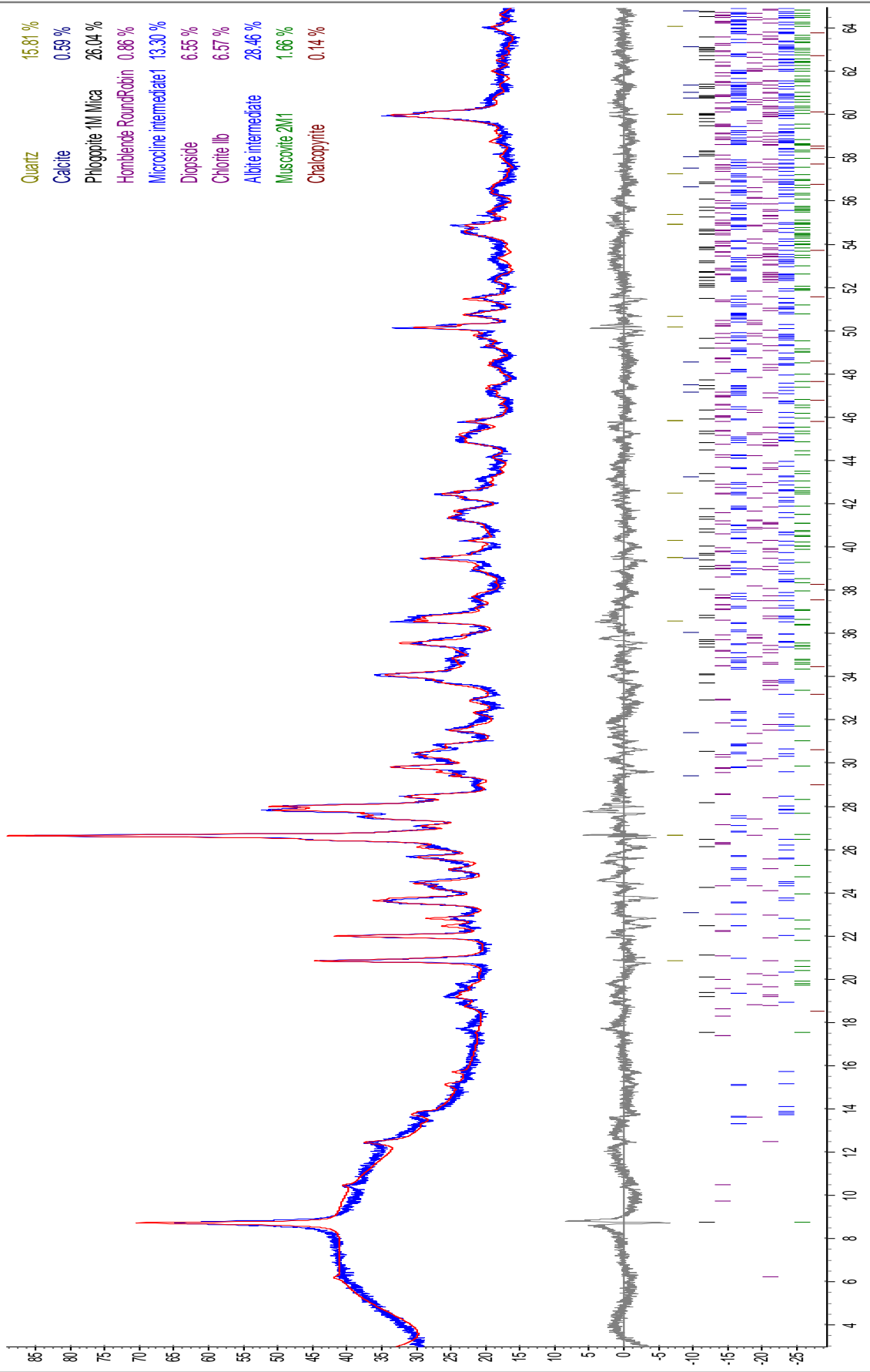
160224: Øst 581



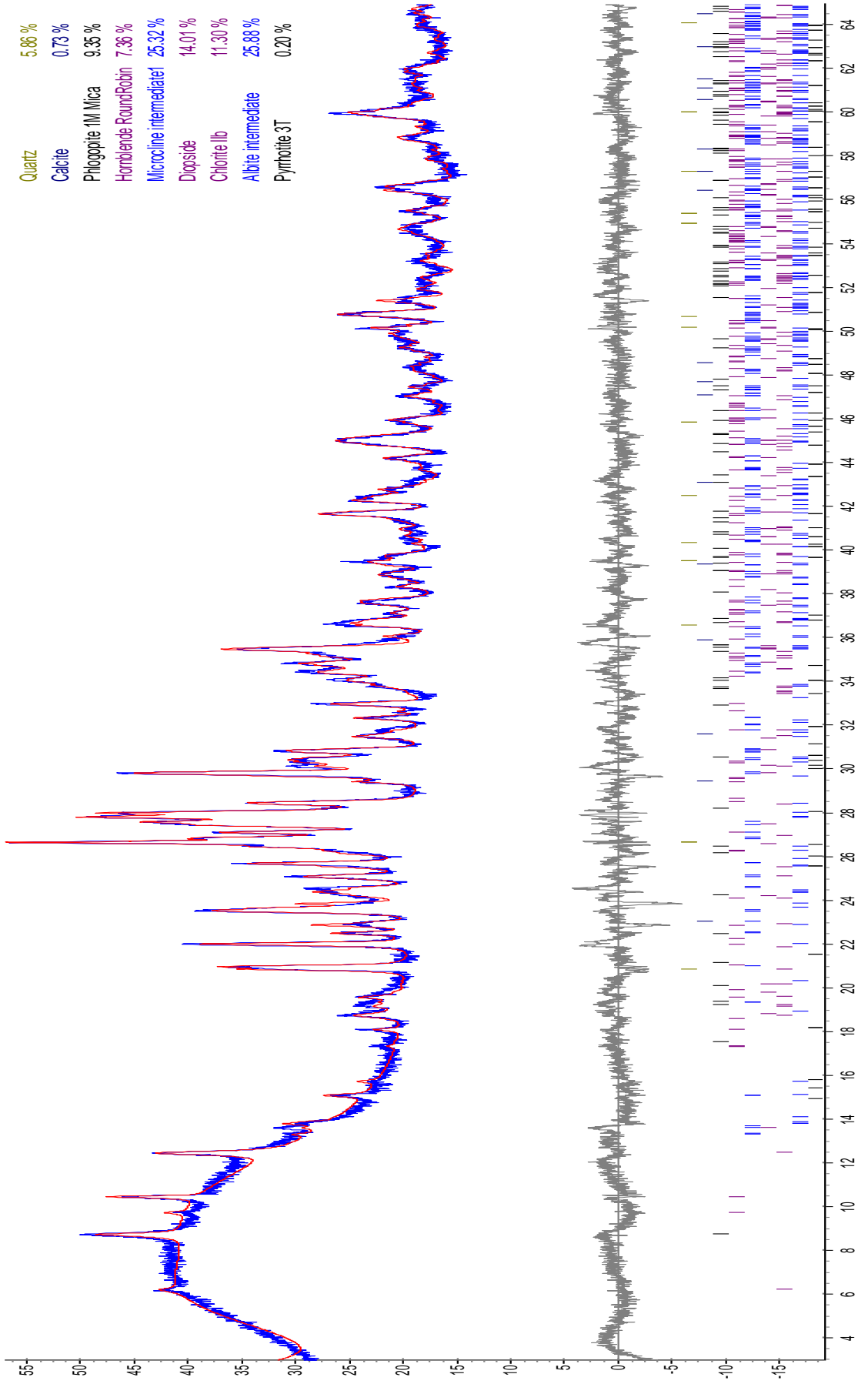
160225: Øst 601



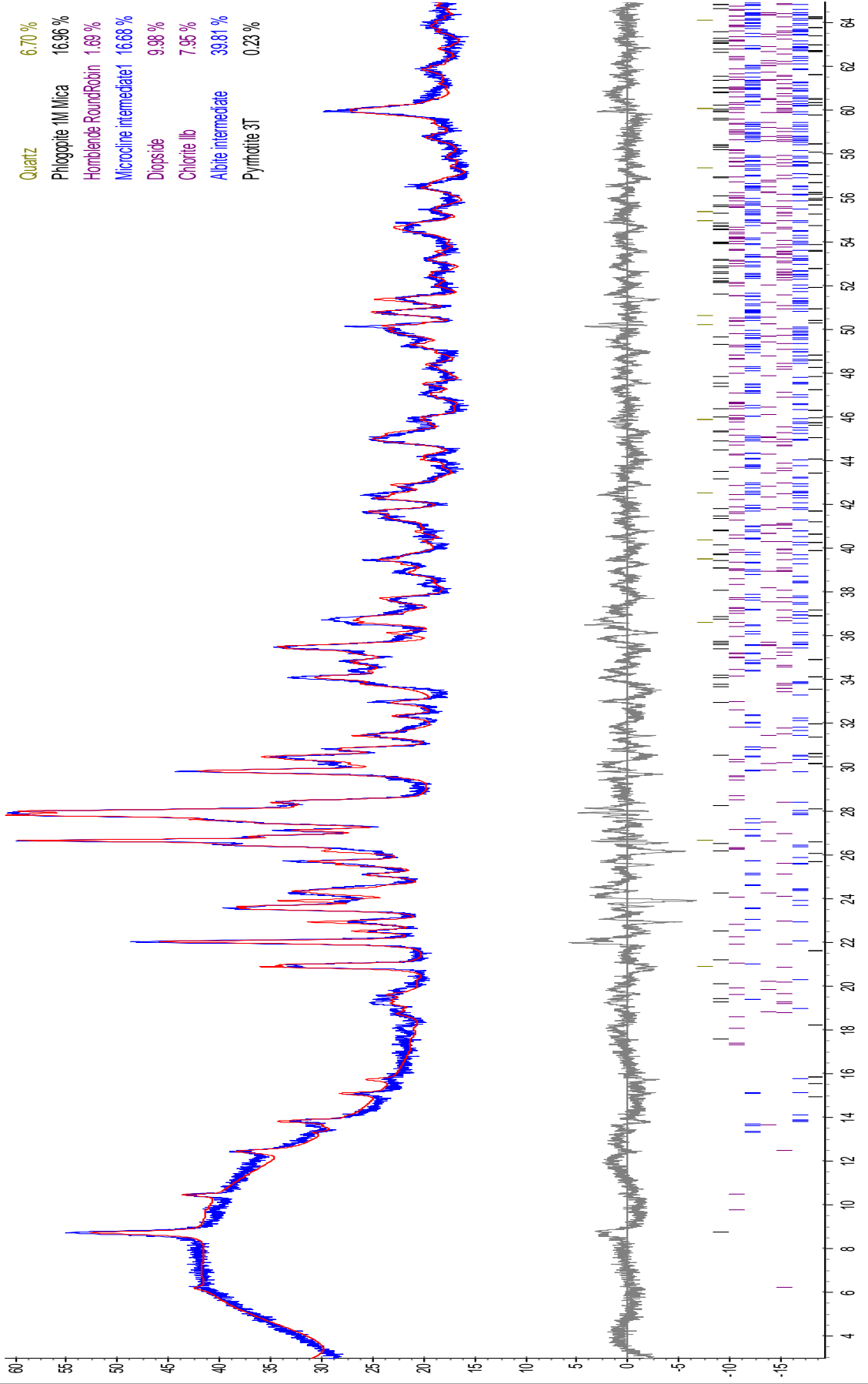
160226: Øst 621



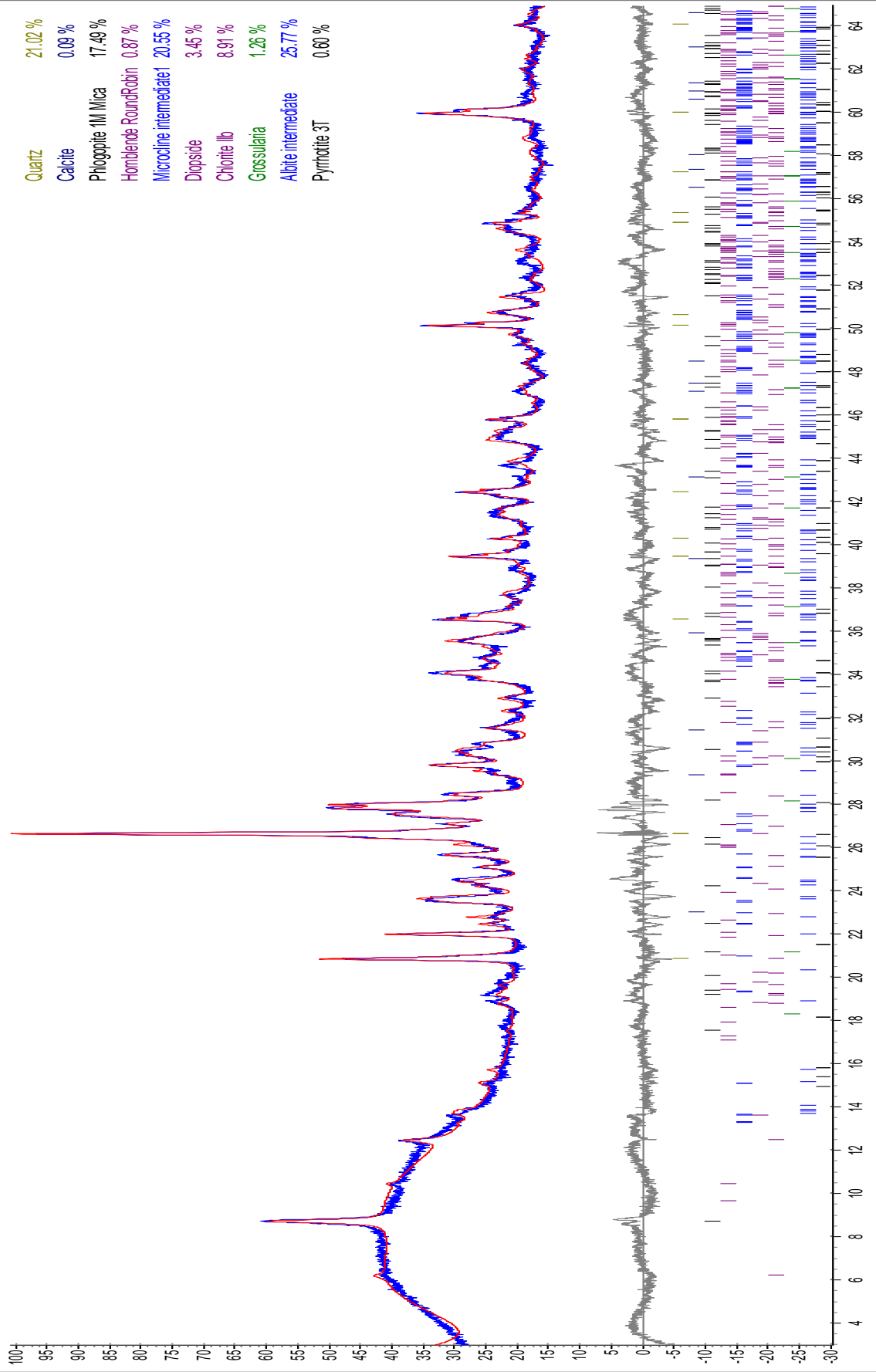
160227: Øst641

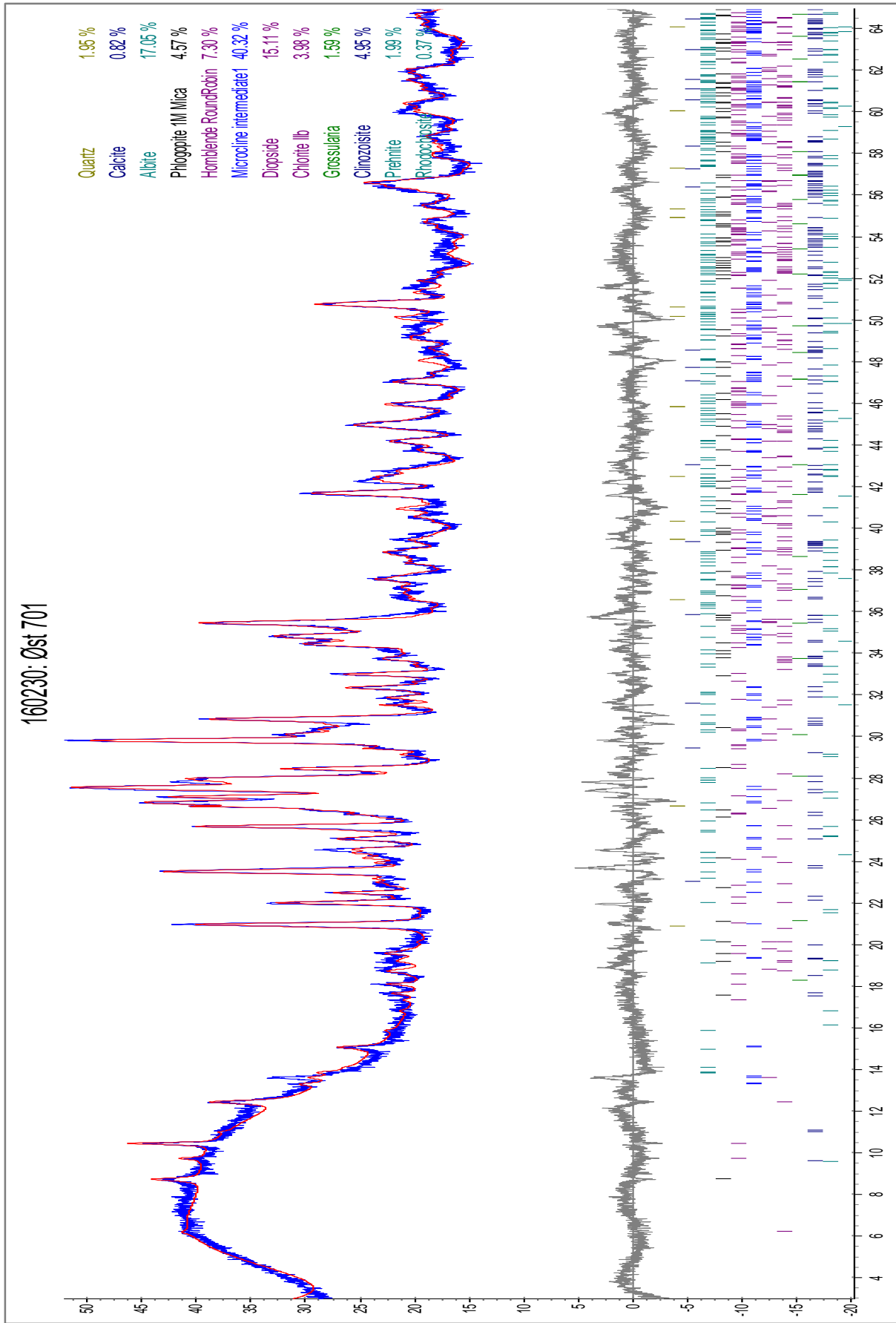


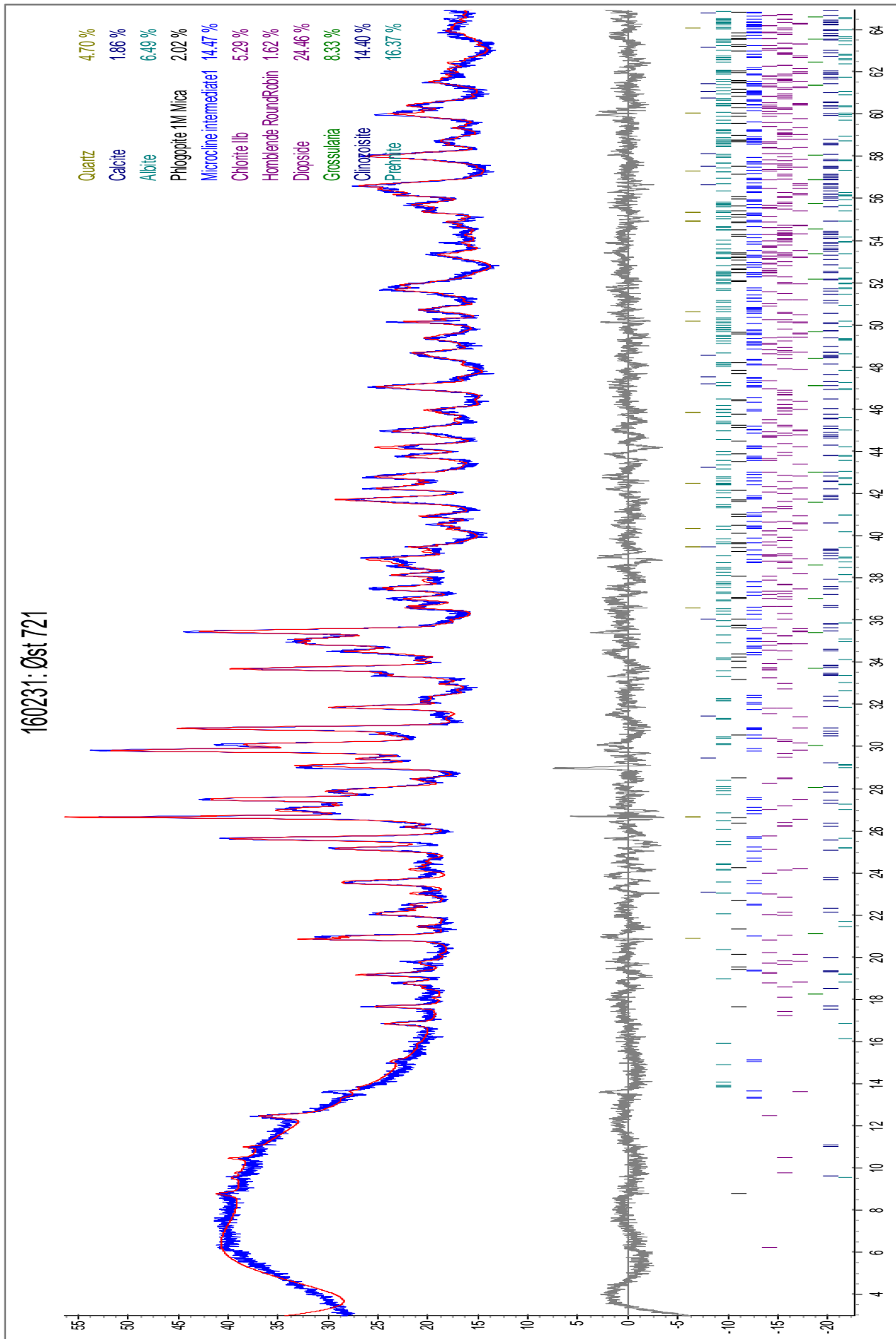
160228: Øst 661

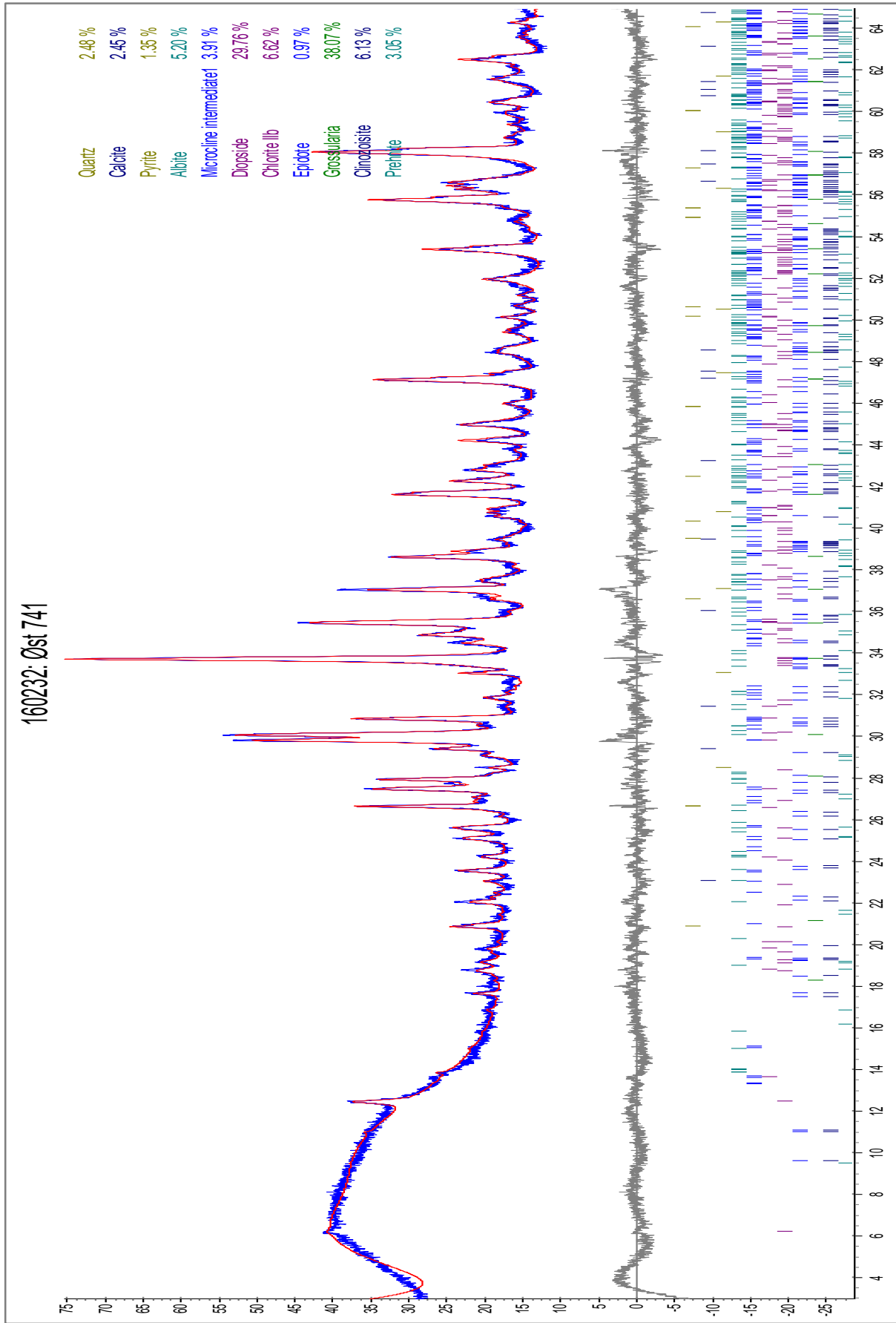


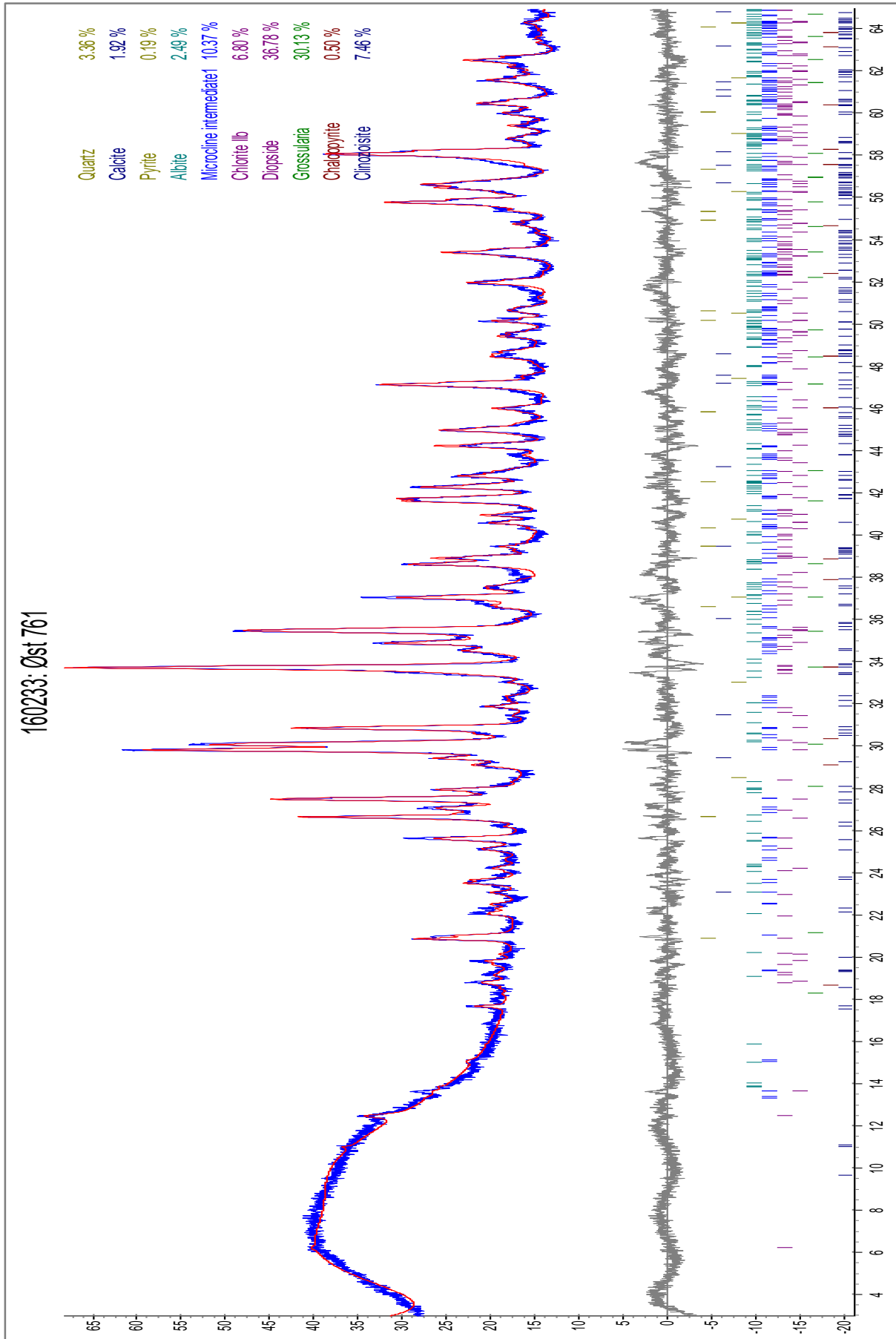
160229: Øst 681

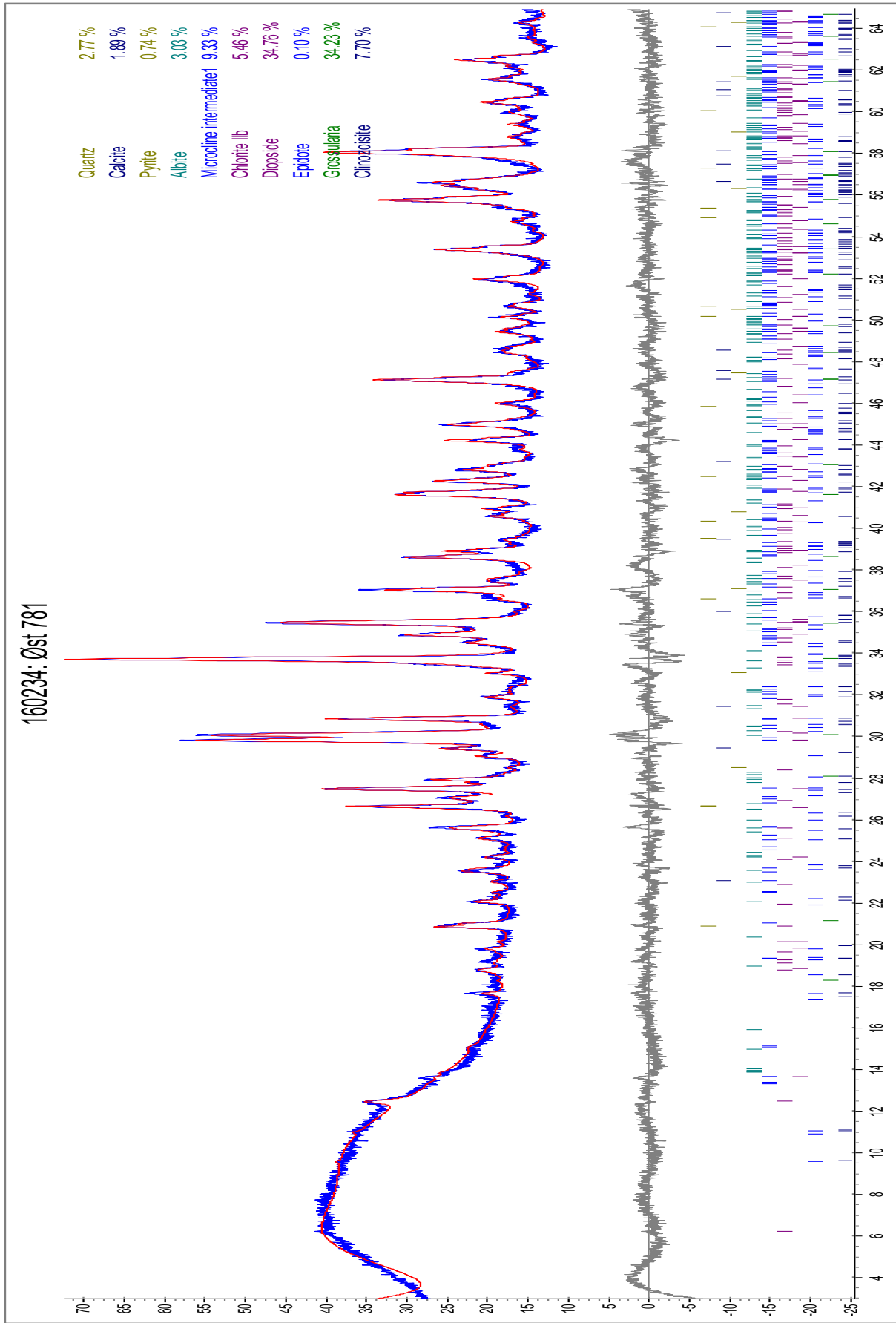


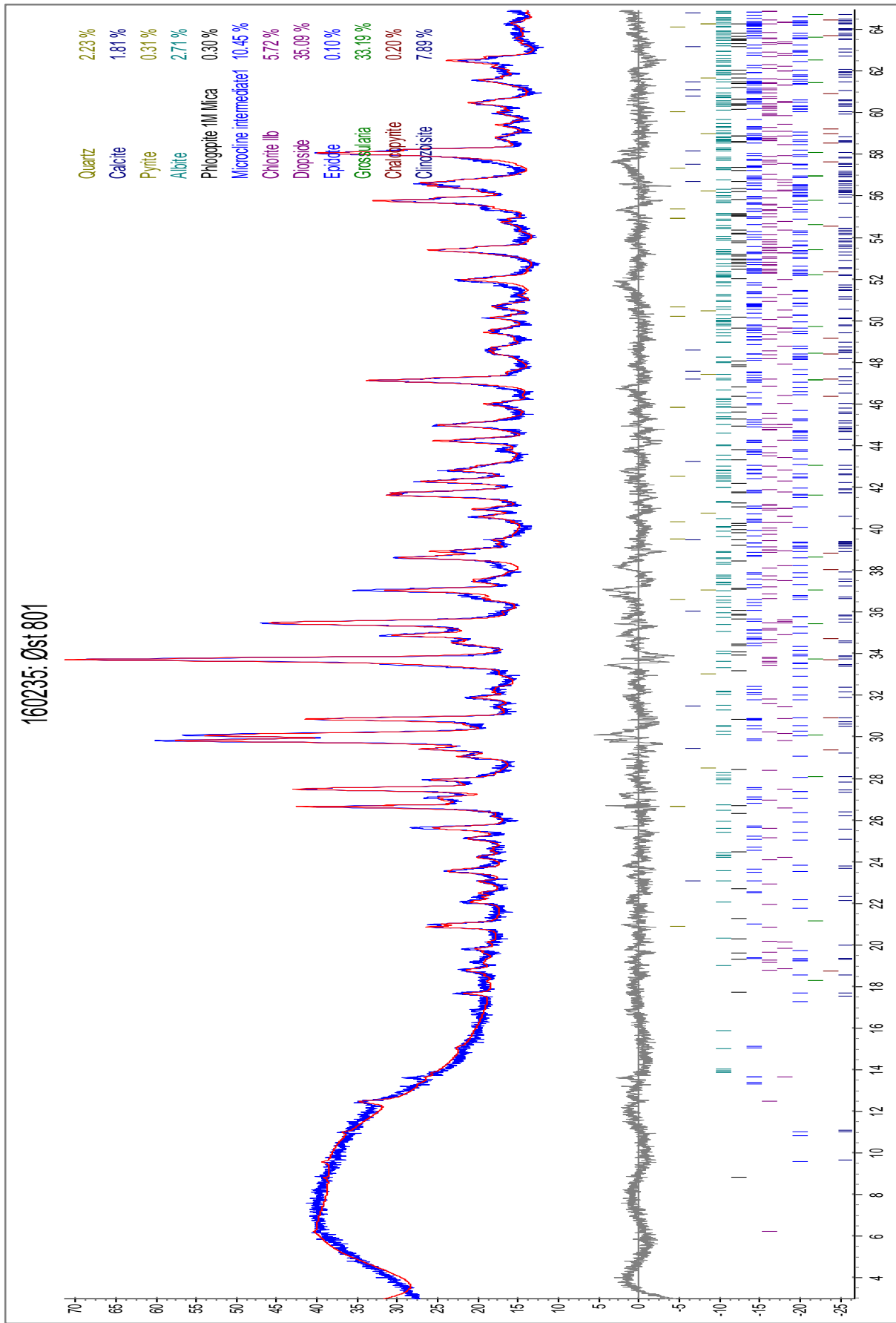




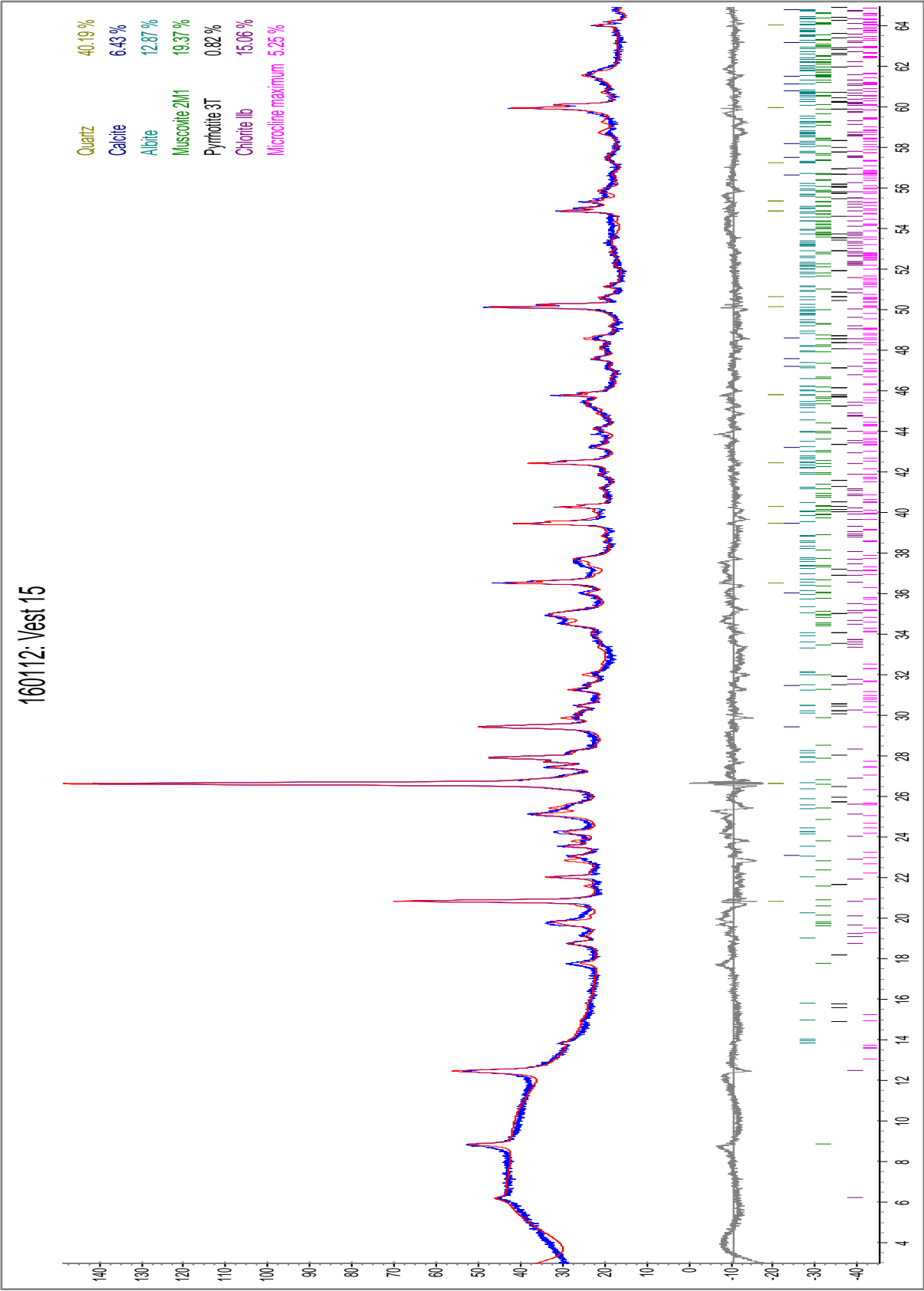




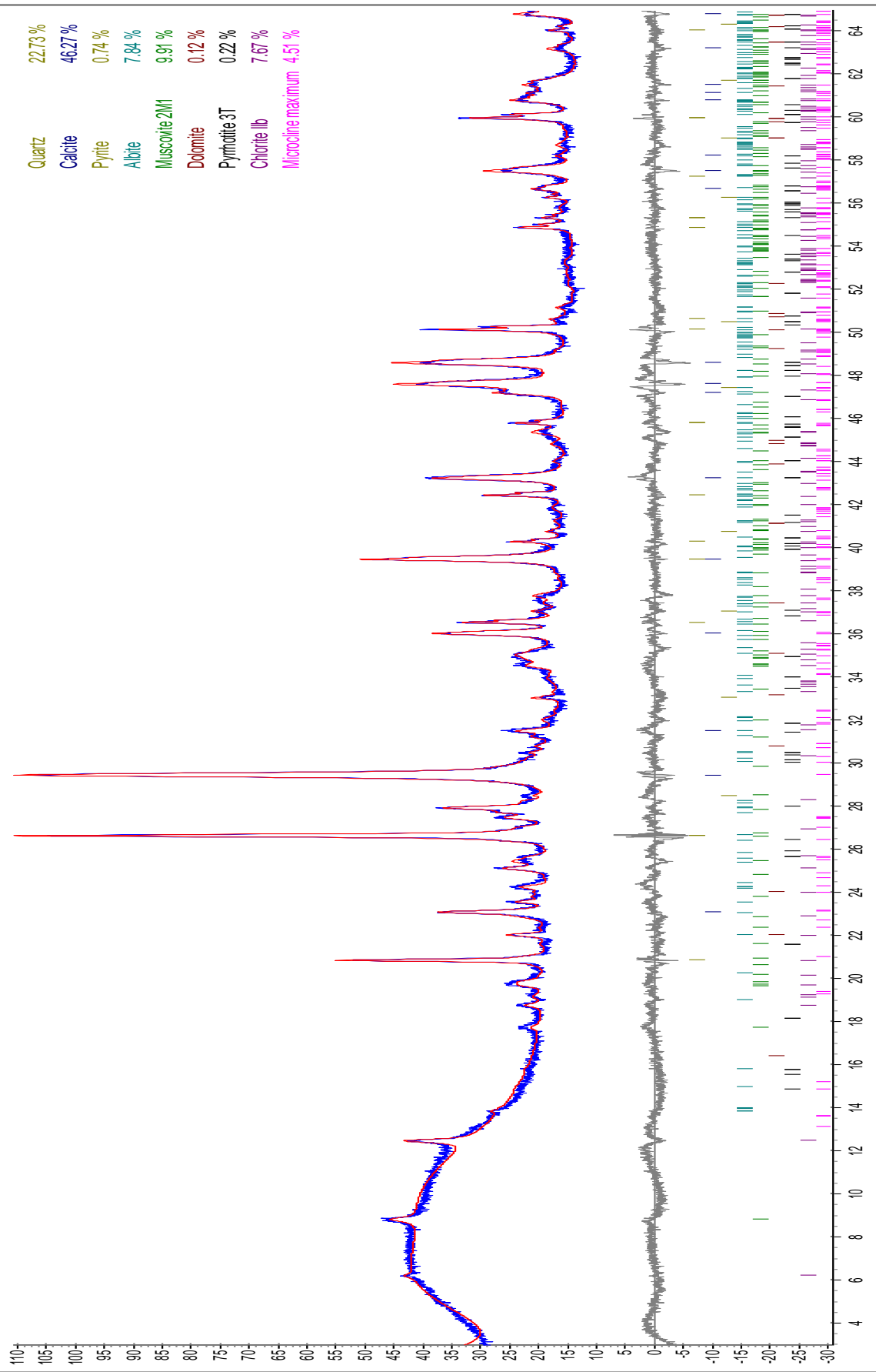




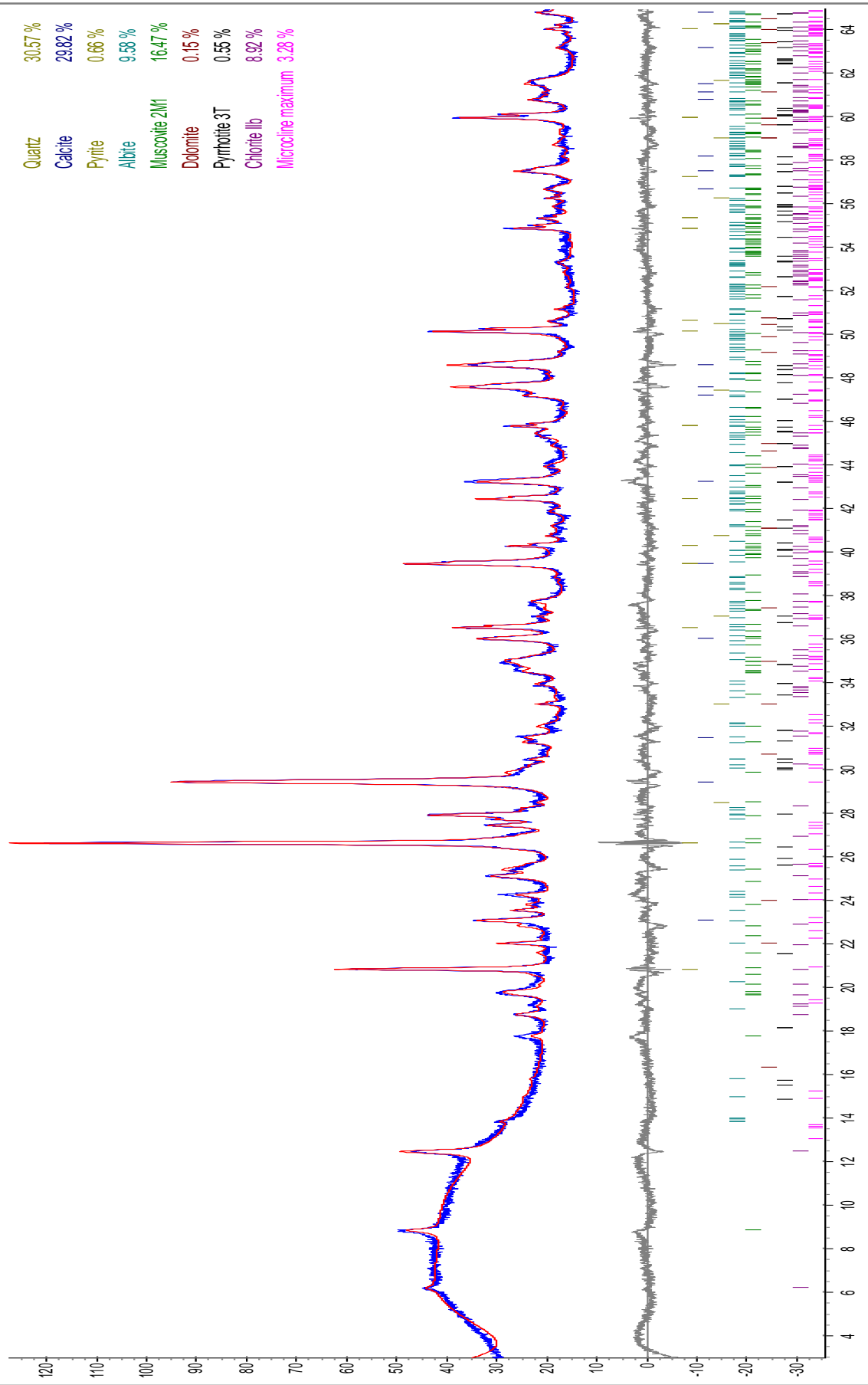
C2 Brønn vest



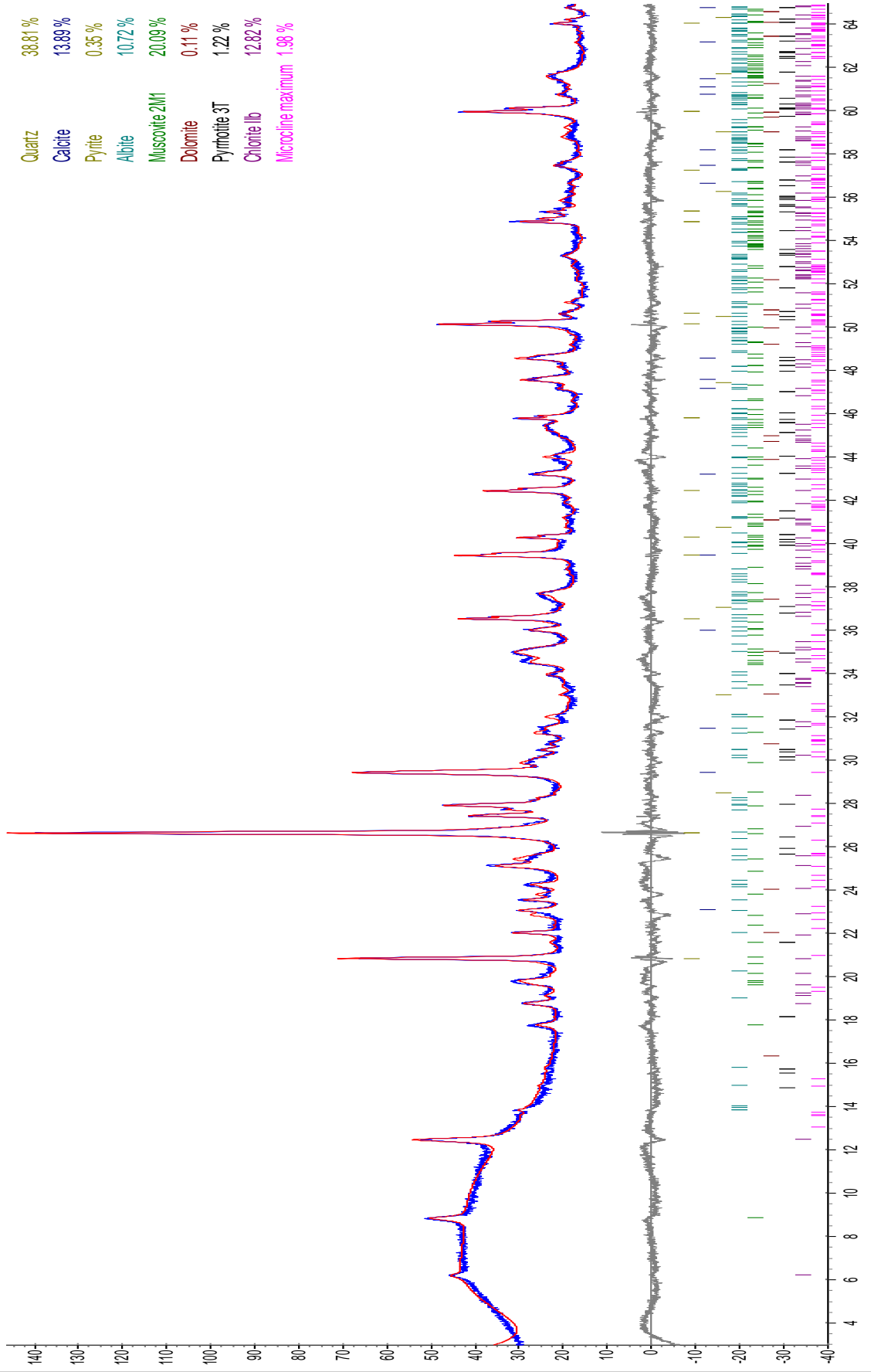
160113: Vest 35



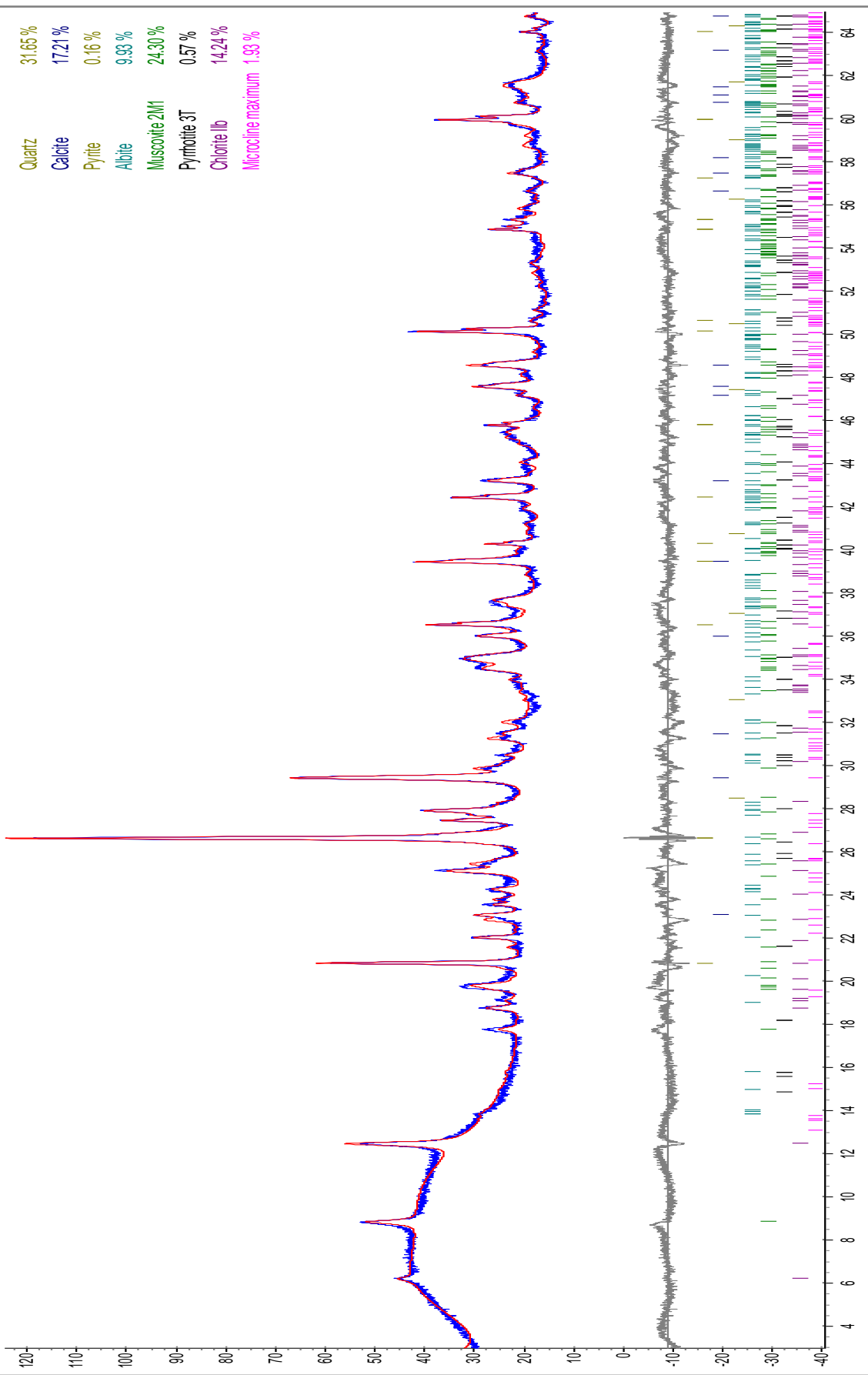
160114: Vest 55



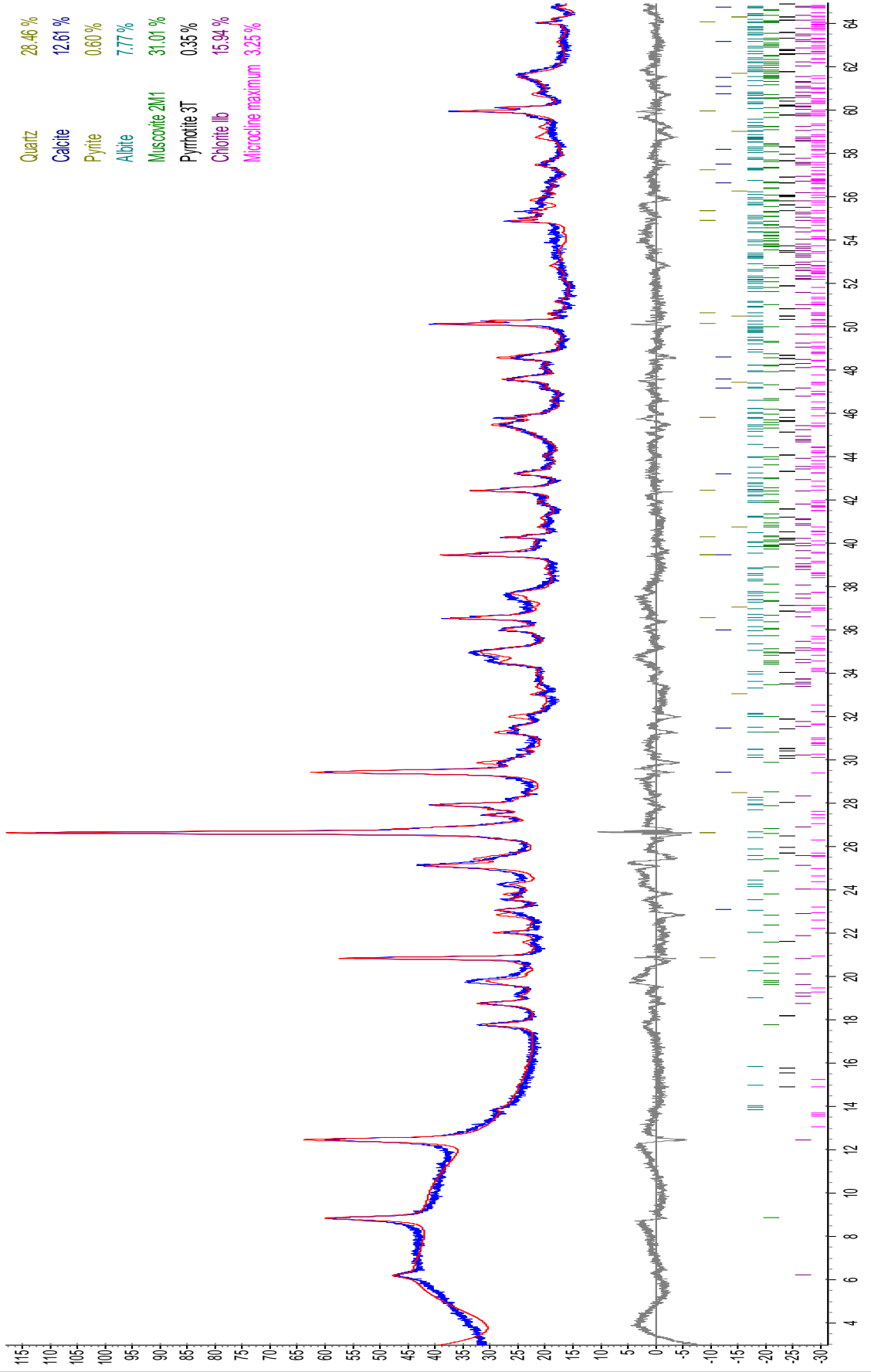
160115: Vest 75



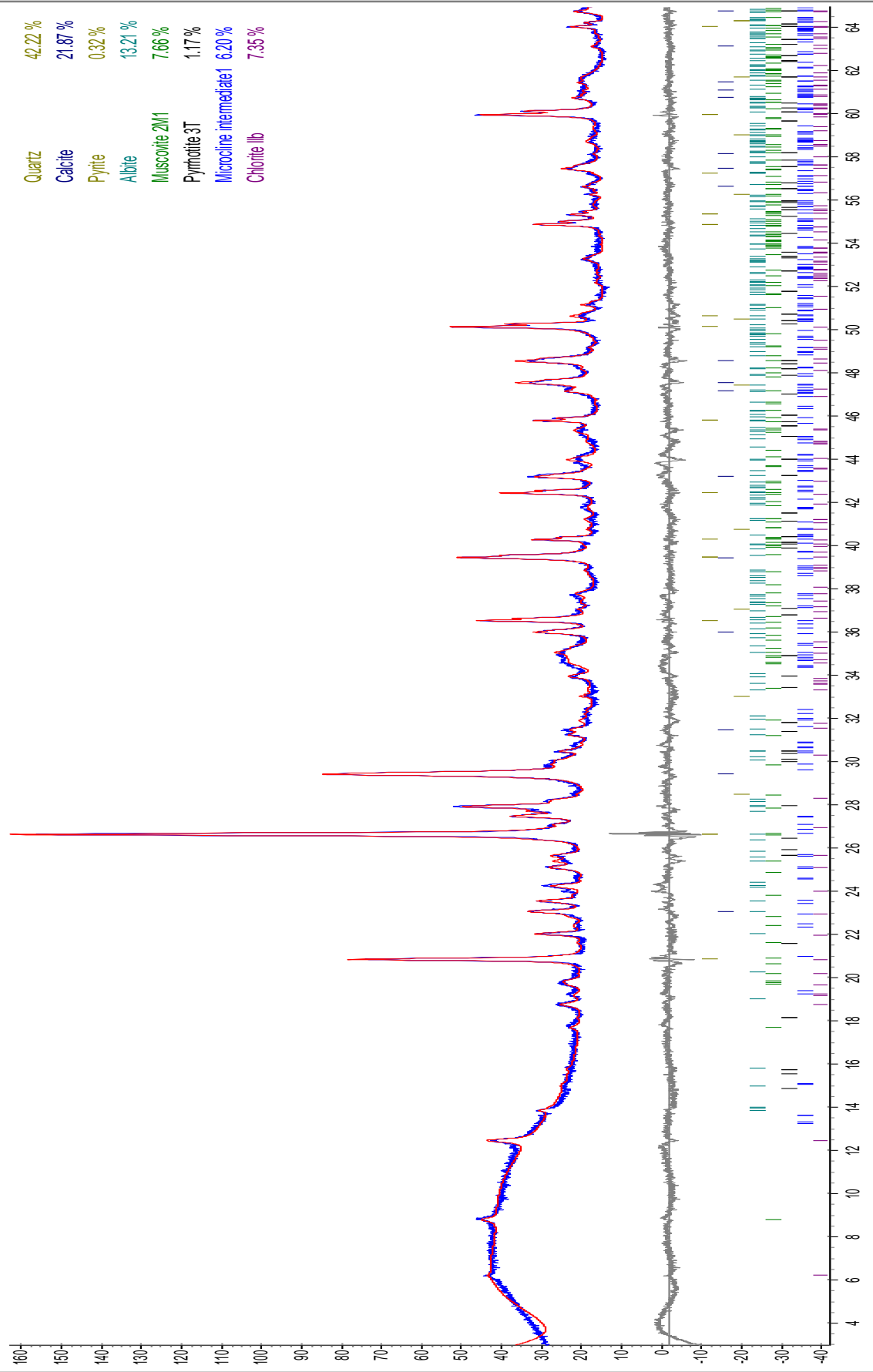
160116: Vest 95



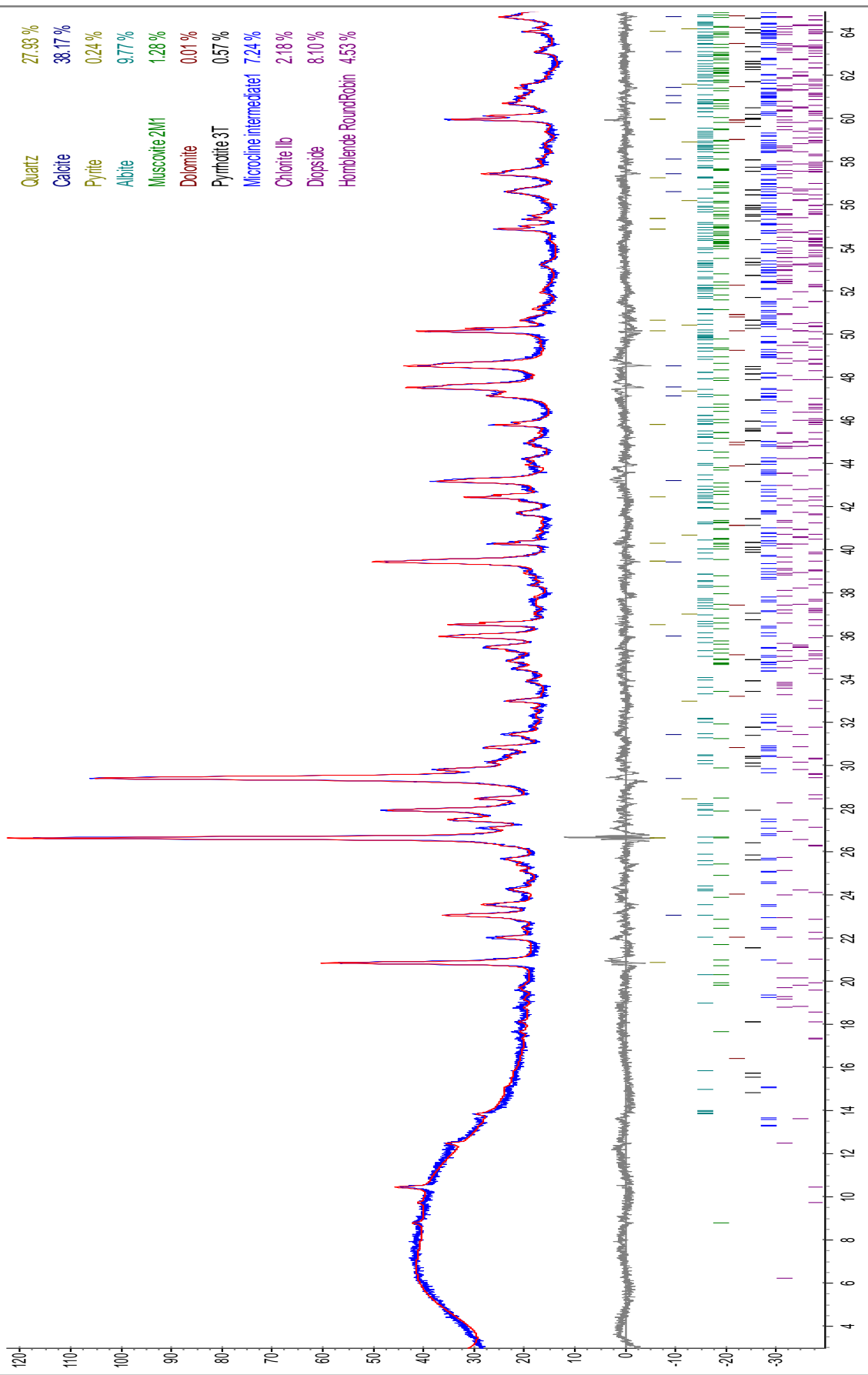
160117: Vest 115



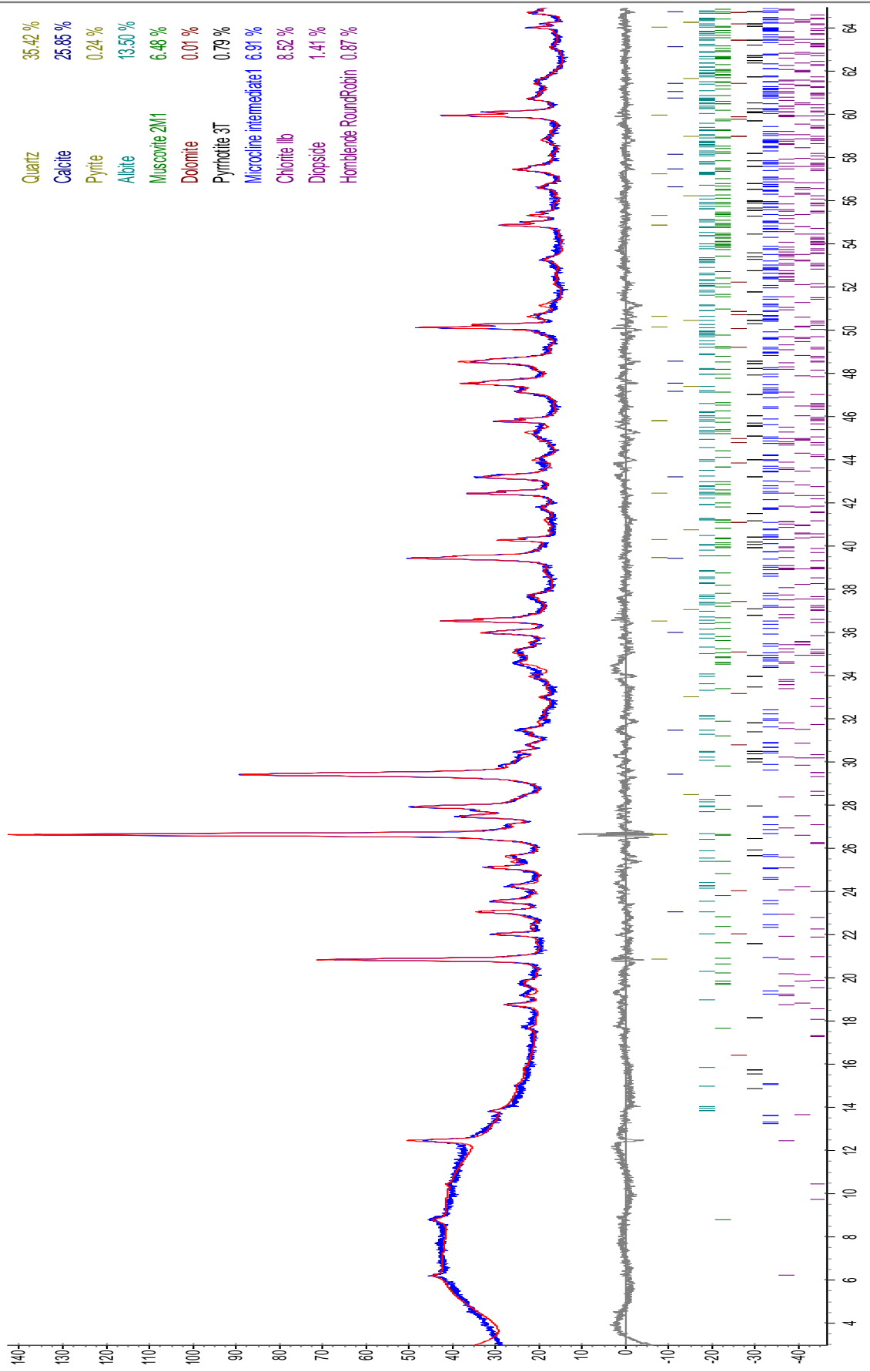
160118: Vest 135



160119: Vest 155



160120: Vest 175



160121: Vest 195

