

**Petrografiske og petrofysiske
egenskaper av et hydrotermalt
ventkompleks fra Karoo-
bassenget,
Sør-Afrika**



Cand.Scient.-oppgave i geologi av

Siri Ann Lorentzen Sali

Institutt for geofag

Universitetet i Oslo

Høst 2004



FORORD:

Denne hovedoppgaven er utført med hjelp fra flere personer.

Først og fremst vil jeg takke hovedveileder Professor Bjørn Jamtveit for å introdusere meg til dette prosjektet, og siden støtte meg faglig, spesielt det siste året. Takk for at du leste igjennom og kommenterte hovedoppgaven min nøye.

En like stor takk går til biveileder Dr. Henrik Svensen for all hjelp i felt, faglig veiledning og hjelp til mikroskopering av katode luminesens. Særskilt vil jeg takke for at du tok deg tid til å dra tilbake til feltlokaliteten Witkop I for å hente noen flere prøver. Takk for at du leste igjennom og kommenterte hovedoppgaven min nøye.

Jeg vil også rette en stor takk til biveileder Dr. Sverre Planke for hjelp i felt og veiledning til hovedoppgaven. Takk for at jeg fikk delta på prosjekt seminaret "Petroleum Implications of Sill Intrusions 2", 2002, på Sem Gjestegård.

En stor takk går også til Stephane Polteau som var en utmerket flink guide i felten i Sør-Afrika. (Thanks to Stepahne Polteau for your guiding in the field in South Africa.)

En særdeles stor takk går til Camilla Haave. Takk for all støtte og faglige diskusjoner, og hjelp under mikroskopering av sveipe elektronmikroskop.

I tillegg vil jeg rette en takk til teknisk personale på Institutt for geofag, Turid Winje og Berit Løken Berg, for all veiledning av teknisk utstyr.

Den aller største takken går til Yuri, mamma og pappa, Gunn Mirja og Merete for deres økonomiske støtte og velvilje gjennom studietiden. Tusen takk.

For øvrig vil jeg rette en takk til alle vennene jeg har fått på Institutt for geofag.

Oslo, 19.10.2004:

Siri Ann Lorentzen Sali

Forside: Witkop I -et hydrotermalt ventkompleks i Karoo-bassenget, Sør-Afrika.

INNHold:

<i>KAPITTEL 1</i>	<i>INNLEDNING</i>	7
1.0	Bakgrunn for arbeidet	7
1.1	Hovedoppgaven	7
1.2	Relaterte oppgaver	9
1.3	Interesseaktører	9
<i>KAPITTEL 2</i>	<i>GEOLOGISK RAMMEVERK</i>	<i>10</i>
2.0	Geologisk rammeverk	10
2.1	Terminologi	11
2.2	Sedimentasjon i Karoo-bassenget	13
2.3	Dwyka gruppen	13
2.4	Ecca gruppen	14
2.5	Adelaide undergruppe (undre Beaufort gruppe)	14
2.6	Tarkastad undergruppe (øvre Beaufort gruppe)	14
2.7	Stormberg gruppen	15
2.8	Karoo magmatiske provins	18
2.9	Magmatiske intrusiver	18
2.10	Ventkomplekser	20
2.11	Observasjoner av ventkomplekser	22
2.12	Dannelsesmodeller for hydrotermale ventkomplekser og timing av intrusivene	23
2.13	Oppsummering	24
<i>KAPITTEL 3</i>	<i>METODIKK OG TEORI</i>	<i>26</i>
3.0	Metodikk og teori	26
3.1	Sedimentpetrografi	26
3.2	Preparering av tynnslip	26
3.3	Sveipe elektronmikroskop (SEM)	27
3.4	Katodeluminesens (CL)	28
3.5	Røntgen diffraktometri (XRD)	28
3.6	Seismiske hastigheter	30
3.7	Stabile lette isotop-analyser	32
<i>KAPITTEL 4</i>	<i>FELTARBEID I KAROO</i>	<i>35</i>
4.0	Feltområde	35
4.1	Prøvetaking	37
4.2	Resultater	38
4.3	Witkop I – et hydrotermalt ventkompleks	46
4.4	Småskala strukturer i Witkop I	46
4.5	Observasjoner utenfor Witkop I	51

4.6	Modena I og Modena II hydrotermale vent komplekser _____	51
4.7	Sammendrag _____	52
<i>KAPITTEL 5 PETROGRAFI OG DIAGENESE</i> _____		<i>54</i>
5.0	Petrografi _____	54
5.1	Diagenese i Karoo-bassenget _____	54
5.2	Resultater _____	56
5.3	Bakgrunnsedimenter (røde slambergarter) _____	56
5.4	Bakgrunnsedimenter (kremgule sandsteiner) _____	58
5.5	Ventsandsteiner fra Witkop I _____	59
5.6	Særegne bergarter fra Witkop I _____	62
5.7	Modena I og Modena II ventkomplekser (KO3HS-25 og -26) _____	67
5.8	Klaster og fragmenter fra Witkop I, Modena I og Modena II, samt bergartene som omgir Witkop I _____	68
5.9	Sammenlikning av sementering _____	71
5.10	Leirmineralogi _____	73
5.11	Porøsitet _____	74
5.12	Litologisammenlikning _____	75
5.13	Oppsummering _____	78
<i>KAPITTEL 6 ELASTISKE EGENSKAPER</i> _____		<i>79</i>
6.0	Elastiske egenskaper _____	79
6.1	Resultater _____	79
6.2	Oppsummering _____	82
<i>KAPITTEL 7 STABILE LETTE ISOTOP-ANALYSER</i> _____		<i>83</i>
7.0	Bakgrunn _____	83
7.1	Prøver _____	83
7.2	Resultater _____	86
7.3	Sammenlikning med annen data _____	87
7.4	Oppsummering _____	88
<i>KAPITTEL 8 DISKUSJON OG KONKLUSJON</i> _____		<i>90</i>
8.0	Diskusjon _____	90
8.1	Feltobservasjoner og ventdannelse _____	90
8.2	Petrografi og ventdannelse _____	92
8.3	Petrografi og morfologi på Witkop I _____	94
8.4	Implikasjoner av hastighetsmålinger _____	95
8.5	Indikasjoner på postvent fluidmigrasjon _____	95
8.6	Leirmineralogi _____	99
8.7	Andre forklaringer _____	99

8.8	Dannelsesmodell	100
8.9	Konklusjon	102
<i>KAPITTEL 9 REFERANSER</i>		<i>103</i>
9.0	Referanser	103
<i>KAPITTEL 10 APPENDIKS</i>		<i>108</i>
10.0	Appendiks	108
10.1	Ventsandsteiner fra Witkop I	109
10.2	KO1S-40	109
10.3	KO1S-41	111
10.4	KO1S-42	114
10.5	KO1S-30	117
10.6	KO1S-45	119
10.7	KO1S-46	122
10.8	KO1S-48	125
10.9	KO1S-50	128
10.10	KO3HS-27	131
10.11	KO3HS-29	134
10.12	Hastighetsprøver	137
10.13	KO1S-31	137
10.14	KO1S-51	140
10.15	KO1S-37	143
10.16	KO1S-3	145
10.17	Rød slamstein	148
10.18	KO1S-21	148
10.19	Kremgul sandstein	150
10.20	KO1S-1	150
10.21	KO1S-8	153
10.22	KO1S-32	155
10.23	KO1S-22	158
10.24	KO1S-6	160
10.25	KO1S-12	163
10.26	KO1S-26	166
10.27	Andre ventkomplekser	168
10.28	KO3HS-25	168
10.29	KO3H-26	171
10.30	Prøvebeskrivelser	175
10.31	Leirmineralinnhold	178

10.32	Tynnslipsbilder	179
--------------	------------------------	------------

KAPITTEL 1 INNLEDNING**1.0 Bakgrunn for arbeidet**

Denne hovedoppgaven inngår i et tverrfaglig prosjekt kalt "Petroleum Implications Of Sill Intrusions" ledet av Professor Bjørn Jamtveit (Universitetet i Oslo), Dr. Sverre Planke (Volcanic Basin Petroleum Research) og Dr. Anders Malthe-Sørensen (Universitetet i Oslo). Den første fasen av prosjektet gikk ut på å øke forståelsen av grunne magmatiske intrusiver i sammenheng med oljeindustriens interesser. Det ble foretatt seismiske tolkninger fra Møre- og Vøring-bassengene offshore Norge, feltarbeid i Karoo, Sør-Afrika, og i østsentrale deler av Grønland, samt geomodelleringer. Denne hovedoppgaven kommer under den andre fasen av prosjektet hvorav hovedaktiviteten er feltarbeid i Karoo-bassenget, Sør-Afrika, med petrologiske og geokjemiske undersøkelser. Under den andre fasen av prosjektet inngår det også integrerte seismiske-, gravitative- og magnetiske undersøkelser og enkeltstudier med hvordan magmatiske intrusiver påvirker sedimenter og hydrokarboner. I tillegg er det startet et prosjekt utover dette som går ut på å øke forståelsen på hvorledes subvulkanske intrusiver kan ha påvirket klimaforandringer og masseutdøelser gjennom tidene.

1.1 Hovedoppgaven

Denne hovedoppgaven er et enkeltstudium av et hydrotermalt ventkompleks, kalt Witkop I, som ble dannet i Karoo-bassenget under den intrusive fasen av Karoo-LIP (store magmatiske provins), 183 ± 1 Ma (Duncan et al., 1997). Et nettverk av magmatiske lagganger og tverrganger ble intrudert i det sedimentære forlandsbassenget i Karoo. Det er foreslått flere modeller for dannelsen av hydrotermale venter; samspill mellom magma og porevann (freatomagmatiske eksplosjoner) kan skape eksplosiv ekspansjon av porevannet og fragmentere magmaen og sidebergarten som resulterer i en kanal som kutter den sedimentære strataen helt til overflaten (Lorenz, 1985); mens en annen modell går ut på at fluidisering er et resultat av høy-hastighetsgasser som har trengt seg opp fra et lavere nivå i skorpen (Mitchell, 1986). Nylig er det foreslått av Svensen et al. (foreligger) at hydrotermale ventkomplekser kan være resultat av prosesser som oppvarming av porevann og modning av organisk materiale i kontaktaureoler som omgir magmatiske lagganger. Dette kan ha skapt rask økning i poretrykk og freatiske utbrudd.

Hydrotermale ventkomplekser i Karoo-bassenget ble studert og kartlagt allerede tidlig på 1900-tallet av du Toit og Gevers (du Toit, 1904; 1912; 1920; Gevers, 1928). Ifølge pioneer-

arbeidet til Gevers og du Toit, fins det to endeledd av hydrotermale ventkomplekser i Karoo-bassenget; vulkanskdominerte og sedimentdominerte. De sedimentdominerte hydrotermale ventkompleksene er fylt med sandstein som likner på Clarens formasjonen, og de består også av sediment-breksje (Svensen, foreligger). Hydrotermale ventkomplekser er hyppig fordelt i den øverste delen av Karoo sekvensen som ligger i østlig del av bassenget, i Stormberg gruppen (figur 2.6). Den nedre delen av Karoo sekvensen (Ecca gruppen) som ligger i vestlig del av bassenget, inneholder flere breksjepiper. Breksjepipene er plassert i Ecca gruppen som også inneholder organiskrike skifre (Whitehill formasjonen). Breksjepipene er karakterisert av smeltet og rekrystallisert, breksjerte og mineraliserte sedimenter. De inneholder dolerittisk materiale (peperitisk breksje) ved kontakten med den magmatiske intrusiven.

For å si noe om dannelsen av det hydrotermale ventkomplekset, og hvorvidt et ventkompleks presenterer en porøsitet- eller permeabilitetsanomali i sedimentbassenget slik at det kan fungere som en sekundær migrasjonsvei for fluider, er det benyttet følgende arbeidsmetoder:

- feltarbeid
- petrografiske analyser fra skanning elektronmikroskop, optisk mikroskop og katodeluminesens
- stabile lette isotop-analyser
- røntgendiffraktometri-analyser for identifisering av leirmineraler
- seismiske hastighetsanalyser

Problemstillingen i denne hovedoppgaven går ut på å karakterisere et hydrotermalt ventkompleks med hensyn på:

- struktur
- mineralogi
- petrografi
- seismiske hastigheter
- stabile lette

I tillegg står det studerte hydrotermale ventkomplekset ut som en positiv erosjonsstruktur i felten, og derfor går hovedoppgaven også ut på å finne årsaken til dette

1.2 Relaterte oppgaver

Det inngår også et annet hovedfag i den andre fasen av "Petroleum Implications Of Sill Intrusions". Denne hovedoppgaven utføres av Camilla Haave (Universitetet i Oslo) og dreier seg om kontaktmetamorfose rundt de magmatiske intrusivene som forårsaket dannelsen av de hydrotermale ventkompleksene i Karoo-bassenget. Haave studerer også modning av hydrokarboner i skiferbergarter rundt intrusivene. I tillegg inngår det også en post-doktoroppgave som utføres av Dr. Henrik Svensen, som dreier seg om prosessene bak dannelsen av hydrotermale ventkomplekser og feltarbeid i Karoo-bassenget.

1.3 Interesseaktører

Denne hovedoppgaven bør være av interesse for flere aktører. Oljeindustrien kan ha nytte av mer kunnskap om opptreden av hydrotermale ventkomplekser og om disse strukturene påvirker migreringsmønstret til fluider i et sedimentbasseng. De som leter etter vann kan ha nytte av kunnskap om porøsiteten og permeabiliteten når de leter etter vannreservoarer. I tillegg er det av interesse for klimaforskere som forsker på masseutdøelser i forbindelse med "Large Igneous Provinces" (Store magmatiske provinser).

KAPITTEL 2 GEOLOGISK RAMMEVERK**2.0 Geologisk rammeverk**

Karoo-bassenget er et "bak-øybue" ("back arc") forlandsbasseng utviklet i fronten av Cape foldebeltet som et resultat av nedsynkningen av Paleostillehavsplaten under Gondwanaplatten (Catuneanu et al., 1998). Karoo-bassenget består av klastiske sedimentære bergarter, den såkalte Karoo sekvensen, som ble dannet i tidsperioden mellom sen karbon og tidlig jura. De klastiske bergartene har en maksimum mektighet på ca. 12 km (Cole, 1992, Johnson, 1976) og er overlatt basaltiske lavaer som er rundt 1,4 km mektige (Eales et al., 1984). Kilden for sedimentene i Karoo sekvensen er bergartene i Cape foldebeltet, mens kilden for de basaltiske lavaene er ukjent. Sammen utgjør de klastiske og de basaltiske bergartene Karoo overgruppe. Dagens Karoo-basseng har en utstrekning på ca. 600 000 km² i areal og dekker halve Sør-Afrika, Lesotho og deler av Swaziland og Mosambik (Cole, 1992).

Fortynning av litosfæren over hele den sydafrikanske kratonen forårsaket magmatisk aktivitet over store deler av Gondwana i løpet av en kort periode i tidlig jura (183±1 Ma, Duncan et al., 1997). Dette skapte en av de fjerde største kontinentale overflatebasaltene i verden (White, 1997). I sydlige Afrika utgjorde det magmatiske produktet en større mengde dolerittiske intrusiver (tverrganger og lagganger) enn mengden basaltiske ekstrusiver (Drakensberg gruppen) (Chevallier og Woodford, 1999). Avsetningen av Clarens formasjonen var ennå ikke avsluttet da Drakensberg basaltene bredte seg over bassenget. Den øverste delen av sedimentsekvensen i Karoo veksler mellom Clarens formasjonen og lagdelte basalter og putelavaer (Walker, 1970). Etter ekstrusjonen av Drakensberg gruppen har det pågått lite tektoniske bevegelser i Karoo-bassenget, og sandsteinsenhetene heller mindre enn fem grader mot Lesotho. De sydlige områdene som grenser mot Cape foldebeltet er derimot svakt deformert (Cole, 1992)..

I forbindelse med dolerittintrusivene ble det dannet mange ventkomplekser i den øvre delen av stratigrafien i Karoo-bassenget (Gevers, 1928). Gevers (1928) og du Toit (1904; 1912) gav disse strukturene navn som vulkansk "neck" (nakke) og diatrem. Hydrotermale ventkomplekser, som er dannet i sedimentbassenger som følge av magmatiske intrusiver, kan ha langtidseffekt på det storskala fluidstrømningsmønsteret i bassenget (Svensen et al., 2003). I den siste tiden har det kommet frem flere eksempler på relaterte fenomener der man kan bevise at hydrotermale venter har fungert som sekundære migrasjonsveier for fluider.

6607/12-1 borehullet fra Vøring-bassenget offshore Norge er boret gjennom en hydrotermal vent, og Svensen et al. (2003) har funnet spor etter kalsitter dannet fra termogent metan i denne hydrotermale venten, og dette er termogent metan som har en dypere kilde enn venten. Fra Karoo-bassenget er det boret opp en kjerne, LA 1/68 Ladybrand Core, fra et hydrotermalt ventkompleks, som viser at komplekset har fungert som en sekundær migrasjonsvei for hydrokarboner: en kalsitt-asfalt åre kutter gjennom et vulkansk dominert hydrotermalt ventkompleks (Svensen og Planke, 2003).

Dette kapitlet omhandler den geologiske settingen for området der det hydrotermale ventkomplekset Witkop I befinner seg i. Det tar for seg avsetningen av de ulike formasjonene i Karoo-bassenget, og den øverste delen er beskrevet litt mer i detalj da det er i denne delen Witkop I er plassert i. På slutten av kapitlet er det beskrevet et klassifikasjonssystem over hydrotermale ventkomplekser som er foreslått av Svensen (2001).

2.1 Terminologi

Noen nøkkelord for denne hovedoppgaven er beskrevet under sammen med hovedreferansene:

Laggang og *tverrgang* er magmatiske intrusiver som har stor lateral utbredelse i forhold til deres tykkelse. Tverrganger kutter strukturen innenfor vertsbergarten og er diskordant, mens lagganger ligger parallelt med strukturen og er konkordant. Lagganger er vanligvis tykkere enn tverrganger (Walker, 1993; Lister og Kerr, 1991; Fowler, 1990)

Doleritt er en fin- eller mediumkornet mafisk intrusivbergart med gabbroid sammensetning, og er det mest vanlige bestanddelen i lagganger og tverrganger (Gjelle og Sigmond, 1994).

Basalt er mafisk magmatisk ekstrusivbergart som består av plagioklas. Labradorisk plagioklas utgjør hovedbestanddelen i grunnmassen, mens mer kalsiumrik plagioklas er tilstede som fenokrystaller. Augitt og olivin er vanligvis tilstede (Klein og Hulburt, 1993).

En *metamorf aureole* er området som omgir en magmatisk intrusiv, og er dannet som et resultat av varmetap fra intrusiven til vertsbergarten. Bergartene i denne sonen er karakterisert med rekrystallisasjon, deformasjon og kompaksjon. Temperaturen er større enn 100°C.

Størrelsen på aureolen er avhengig av permeabiliteten til vertsbergarten (Hanson, 1992, 1995).

Ventkompleks er en struktur som består av ulike litologiske, strukturelle og morfologiske komponenter, og den er dannet som et resultat av transport av lavviskøse materialer til overflaten. Transport av magma til overflaten kan produsere et vulkansk kompleks, mens transport av finkornede sedimenter og fluider til overflaten danner et sedimentvulkansk kompleks. Transport av varme fluider til overflaten kan produsere et hydrotermalt kompleks (Svensen et al., 2003; 2003; 2004; Jamtveit et al., i trykken).

Et *hydrotermalt ventkompleks* er et sedimentvulkansk kompleks som er dannet av et hydrotermalt system som genetisk er lenket til en magmatisk intrusiv (Svensen et al., 2003). Et hydrotermalt ventkompleks har to endeled; sedimentdominerte ventkomplekser og magmatiskdominerte ventkomplekser.

Fluidisering er den prosessen som får en blanding av partikler (fast stoff eller væske) til å komme i suspensjon av et fluid (væske eller gass) som strømmer slik at friksjonskreftene mellom fluid og partikler balanserer vekten på partiklene slik at hele massen oppfører seg som et fluid (f. eks. Wholetz og Sheridan, 1979). Fluidisering krever en minimum hastighet på gasstrømmen slik at ekspansjonshastigheten på den fluide fasen spiller en dominerende rolle (Kokelaar, 1982). Fluidisering kan bli dannet som følge av for eksempel freatomagmatiske eller freatiske eksplosjoner.

Freatomagmatisme er vulkanske eksplosjoner som ekstruderer både magmatiske gasser og damp; det er forårsaket av magma som kommer i kontakt med grunnvann eller overflatevann (Jackson, 1997). *Freatiske* eksplosjoner er vulkanske utbrudd eller eksplosjoner av damp, leire eller andre materialer som ikke er varme; det er forårsaket av oppvarming og konsekvent ekspansjon av grunnvann pga. en underliggende magmatisk varmekilde (Jackson, 1997).

Maarer er små vulkaner med kratre som kutter pre-utbruddsoverflaten. *Diatremer* representerer kollapsstrukturen i undergrunnen til de fleste maarene, og kan inneholde fragmenter fra både lavere og høyere stratigrafiske nivåer (Lorenz, 1985, Clement, 1982).

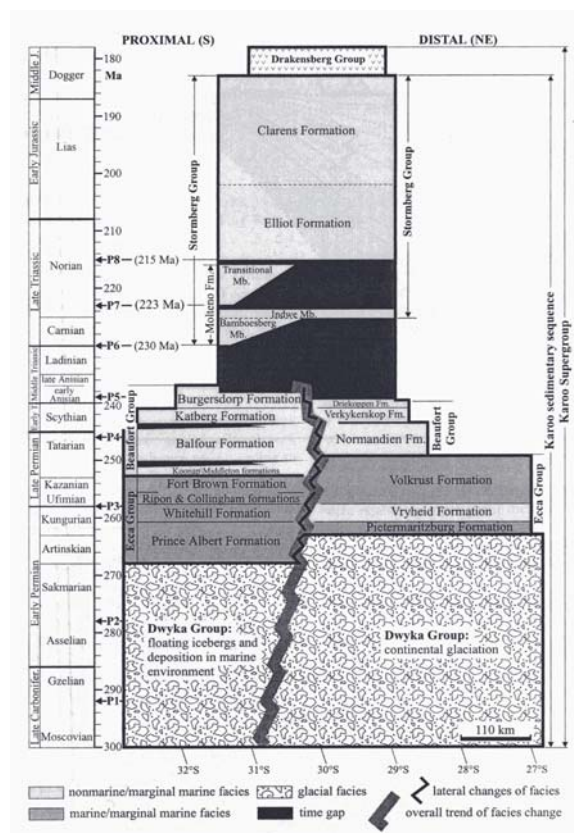
Diagenese er alle kjemiske, fysiske og biologiske endringer som sedimenter er utsatt for etter avsetning og under og etter litifisering, eksklusive forvitring og metamorfose (Twenhofel, 1937).

2.2 Sedimentasjon i Karoo-bassenget

Figur 2.1 er en oversikt over de enkelte enhetene i Karoo-bassenget. Den nederste enheten i Karoo-bassenget består av mindre enn 700 m tykke glasiøle sedimenter avsatt i perioden pennsylvania karbon til tidlig perm (Visser, 1989). De overliggende sedimentene (< 11 km mektige), som ble avsatt mellom tidlig perm og midt jura, består av offshore-, delta- og terrestriske avsetninger som ender opp i ørkenfacies. Den øverste enheten (ca. 1,4 km tykk) består av basaltisk lava fra jura. De sedimentære enhetene reflekterer endrende avsetningsmiljø fra glasiøal til dyp marin (Dwyka og Ecce gruppene), og fra dyp marin til fluvialt deltamiljø (øvre Ecce gruppen). Det fluviale avsetningssystemet (Beaufort gruppen, Molteno- og Elliot formasjonene) går over mot ørkenmiljø (Clarens formasjonen). Flere parametre var gjeldende for utviklingen av bassenget, disse omfatter sykluser av belastning og avlastning i Cape foldebeltet samt kompetansen på den underliggende skorpen (Catuneanu et al., 1998).

2.3 Dwyka gruppen

De eldste sedimentene i Karoo-bassenget er fra sen karbon og består av glasiøle avsetninger av både grunnet og flytende is. Glasiøal sedimentasjon dominerte helt til tidlig perm. Litologien består av diamikritt med generelt mye leireinnhold, sandstein, konglomerat, rytmitt og leirstein med eller uten dropstein (Johnson et al., 1997). Dwyka gruppen har en mektighet på ca. 700 m. I tidlig Perm gikk isen tilbake og den glasiøle avsetningen ble transgredert, og marin leire ble avsatt over (nedre Ecce gruppen) (von Bruun et al., 1999 og Visser, 1989).



Figur 2.1: En oversikt over de ulike litologiske enhetene i Karoo-bassenget (Catuneanu et al., 1998).

2.4 Ecca gruppen

Ecca gruppen var avsatt i perm og består av en serie av formasjoner som er avsatt i ulike miljøer i et nedsynkende basseng. Formasjonene reflekterer store laterale faciesvariasjoner. Ecca gruppen består hovedsaklig av gråvakter, siltstein, sandstein og skifre. Tykkelsen på Ecca gruppen varierer etter facies: nordlige facies (Natal) er ca. 1200 m tykk (Ryan, 1967, Winter and Venter, 1970), sydlige facies (S.Cape) er ca. 3000 m (du Toit, 1954, Johnson, 1966), vestlige facies er ca. 1600 m tykk og de sentrale faciesene er ca. 1500 m (Ryan, 1967).

Sedimentasjonsraten overgår nedsynkningsraten i løpet av perm periode slik at bassenget er utsatt for en gradvis grunning. Som en konsekvens av dette blir avsetningsmiljøet fra dypmarin undersjøiske vifter mot fluvialt dominerte sanddeltaer (Kingsley, 1981, Visser et al., 1980, Cole, 1992).

2.5 Adelaide undergruppe (undre Beaufort gruppe)

Den sydlige delen av bassenget ble løftet opp og den regressive fasen ble forsterket noe som resulterte i avsetningen av den fluvialt dominerte Beaufort gruppen i sen perm til tidlig trias. Adelaide undergruppe (sen perm) representerer ikke-marine forhold i Karoo-bassenget. Den nedre delen av Beaufort gruppen har en gjennomgående oppoverfinende sekvens ettersom den fluviale energien minket da kildeområdene ble erodert (Turner, 1985). Avsetningene består av blågråe og grårøde leirstein og fin- til mediumkornet feltspatisk sandstein.

2.6 Tarkastad undergruppe (øvre Beaufort gruppe)

Tarkastad undergruppe, som er avsatt i tidlig trias, er blitt inndelt i en proksimal og en distal sektor i Karoo-bassenget (Catuneanu et al., 1998). Den proksimale sydlige delen av Karoo-bassenget består hovedsaklig av tykke, lateralt utbredte, lys oliven grå, grovkornede sandstein avsatt i grunne forgrenede miljø. Rød fargede siltsteiner og leirsteiner ble avsatt i blandet bunnlast meandrerende miljø. Den distale nordlige faciesen består av tynne finkornete kanalsandsteiner laminert av silt og leirstein som har vært avsatt i suspendert bunnlast meandrerende elvesystemer. Tarkastad undergruppe når en maksimum tykkelse på ca. 2000 m i sør (Johnson, 1976), som er redusert til ca. 800 m i midten av dens utbredelse. Slik som Adelaide undergruppe kan også Tarkastad undergruppe betraktes som en oppoverfinende sekvens. Kontakten mellom Tarkastad undergruppe og overliggende Molteno formasjonen er inkonform (Catuneanu et al., 1998).

2.7 Stormberg gruppen

Stormberg gruppen (230-185 Ma) er delt inn i tre formasjoner: Molteno formasjonen, Elliot formasjonen og Clarens formasjonen. Etter avsetningen av øvre Beaufort gruppen i tidlig trias ble sydlige Afrika løftet opp og utsatt for erosjon som en del av den siste fasen av sammenslåingen av Pangea. Stormberg gruppen ble derfor separert fra den underliggende Tarkastad undergruppe av en hiatus (SACS, 1980, Cole, 1992). Cape foldebeltet ble videre forkortet pga. tektoniske episoder slik at forlandet begynte å synke ned.

Stormberg gruppen har et helt annet sedimentært avsetningssystem enn de andre gruppene i Karoo sedimentsekvensen. I motsetning til de andre gruppene skiller det her ikke mellom proksimale og distale facies, for Stormberg gruppen har nemlig aldri strekt seg helt ut til Cape foldebeltet. Hele avsetningen kan betraktes som en distal Karoo facies, og kilden for sedimentet som ble tilført kom fra omarbeidet eldre Karoo strata (Dingle et al., 1983).

Molteno formasjonen (277-209 Ma, SACS, 1980) består hovedsaklig av to oppovergrovende sekvenser (Hancox, 1998) dannet av forgrenede elvesand. Ved bunnen ligger Bamboesberg- og Indwe sandsteinsmedlemmer og øverst ligger Transitional medlem. I tillegg fins det forekomster av siltstein, leirstein og kullavsetninger. I den nordlige distale delen av bassenget var avsetningsmiljøet dominert av lakustrine- og flomsletteforhold der rød leire og kanal innfyll (Elliot formasjonen) ble avsatt. Disse avsetningsforholdene migrerte mot kilden og til slutt dekket de hele den sandsteinsrike Molteno formasjonen.

Elliot formasjonen

Elliot formasjonen ble tidligere kalt "The Red Beds" (De røde lagene) på grunn av dens farge er avsatt sen trias-midtre jura (Gauffre, 1993). De nederste 200 m av sekvensen består av kanalsandsteiner med leirklaster og sandsteiner. De midterste 200 m er dominert av sandsteiner avsatt av sidekanaler "crevasse splay", og de øverste 40-70 m er dominert av dynesandsteiner. Visser og Botha (1980) har tolket de ulike litologiene dit hen at de presenterer en progressiv minking i avsetningsenergi over tid. Den øverste enheten var dominert av et avsetningsmiljø der det av og til forekom flom som hadde stor utstrekning. Tørkesprekker og caliche indikerer en økende grad av forørkning. Dette kan forklares av posisjonen til det sydvestlige Gondwanaland som migrerte fra polare breddegrader mot mer tropiske breddegrader. Den eoliske innvirkningen øker oppover i sekvensen. De eoliske

sandsteinene starter som meter tykke lag i den øverste delen av Elliot formasjonen før det eoliske miljøet var fullstendig etablert da Clarens formasjonen ble avsatt.

Clarens formasjonen var avsatt i våt ørkenmiljø fra sen trias til sen jura periode (Olsen og Galton, 1984). Tidligere ble Clarens formasjonen kalt "The Cave sandstones" (Hulesandsteinene) ettersom utvitrede huler er karakteristisk for denne formasjonen. Kontakten mellom Clarens- og Elliot formasjonen er konform og gradvis. Overgangssonen er karakterisert med linser fra Clarens formasjonen som er avsatt i strata fra Elliot formasjonen. I motsetning til den nedre kontakten så er den øvre kontakten mellom Clarens formasjonen og Drakensberg basaltene skarp. Dog noen pyroklastiske bergarter har blitt funnet under denne kontakten, noe som indikerer at vulkanismen terminerte sedimentasjonen (Eriksson, 1984).

Clarens formasjonen består av kremgul finkornet sandstein, siltstein og leirstein og en liten andel grovkornet sandstein (Eriksson, 1984). Den eoliske avsetningen dannet vindblåste dyner mens grunne playainnsjøer også forekom ved mindre mildere klima (Smith, 1990). Flommiljø ble mer dominerende mot slutten av avsetningen av Clarens sandsteinene mens klimaet endret seg mot mer våt ørken.

Det har blitt identifisert fire sedimentære facies av Clarens formasjonen i Natal-Drakensberg distriktet, basert på litologi, sedimentære strukturer og fossiler (Eriksson, 1981). Den første faciesen består av finkornet sandstein med horisontale laminasjoner, konvolutt laminasjon og lagning. Andre sedimentære strukturer som planære- og traukryssjikt, leirklaste, tørkesprekke og sporfossiler som planolites gravefossiler og dinosaurfotspor er også funnet. Den første faciesen reflekterer våt ørkenmiljø. Den andre faciesen består av medium til grovkornet sandstein i oppover finende sekvenser. Sedimentære strukturer som planære- og traukryssjikt og kanaler er også funnet. Sedimentene ble avsatt i forgrenede elvekanaler og flomsletter. Den tredje faciesen er karakterisert av massiv finkornete sandsteiner med utglidningsstrukturer "slumping". Mens den fjerde faciesen er dominert av finkornet sandstein bestående av storskala eoliske kryssjikt. Den tredje og den fjerde faciesen er tolket dit hen å være dannet pga. henholdsvis massestrøm og vindblåste prosesser.

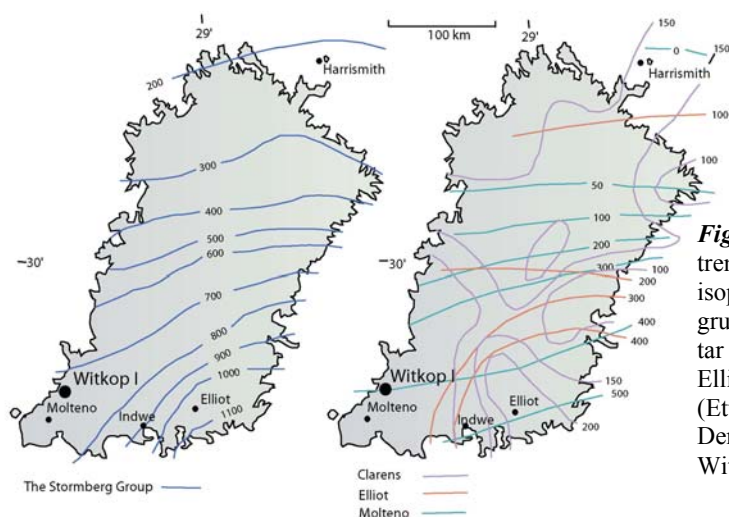
Seme (1997) har studert sedimentdominerte ventkomplekser i Elliot- og Clarens formasjonen i nærheten av Rossouw, nordlig del av Eastern Cape. Slik beskriver han Clarens formasjonens fremtredende i felt: Clarens formasjonen er dominert av sandstein med grå og gulbrun farge

som er en stor kontrast til overliggende mørke basalter og underliggende Elliot formasjon som er dominert av slambergarter. Clarens formasjonen kan deles inn i fire litologiske enheter, fra toppen av:

- 1) Fint laminerte, tynt lagdelte sandstein
- 2) Massiv sandstein
- 3) Sandstein med store, planære kryssjikt
- 4) Sandstein som vekselvis ligger mellom siltstein

Clarens formasjonen er vanligvis kraftig forvitret (Eriksson, 1981). Ofte finner man en sfærisk forvitringstype, og i tillegg ser bergarten veldig massiv ut pga. forvitringen.

Tykkelsen på Stormberg gruppen er vist på et isopak-kart i figur 2.2. (Beukes, 1970, Dingle et al., 1983). Isopakene til Stormberg gruppen inkludert alle formasjonene er vist i figuren til venstre mens figuren til høyre viser tykkelsen på de enkelte formasjonene hver for seg. Molteno- og Elliot formasjonen viser samme trend ved at deres tykkelse reduseres mot nordøst. Clarens formasjonen har en mer svingende trend der den tykkeste delen forekommer i sydøst mens dets hovedsenter for avsetning følger en svingende nordlig trend fra Harrismith området (120 m tykk) til sydøst (ca. 260 m tykk). Derfor er det tydelig at bassengeometrien har endret seg etter avsetningen av Elliot formasjonen og før avsetningen av Clarens formasjonen. Både Molteno- og Elliot formasjonen når en maks tykkelse på over 400 m. Tykkelsene for formasjonene i Witkop I feltområdet er vist i figur 2.2. Figuren viser at Clarens formasjonen er omtrent 100 m tykk og at Elliot formasjonen er mellom 200-300 m tykk.



Figur 2.2: Isopak-kart som viser ulike trender i tykkelser. Figuren til venstre viser isopakene for alle formasjonene i Stormberg gruppen sammenlagt, mens figuren til høyre tar for seg de ulike isopakene for Molteno-, Elliot- og Clarens formasjonen hver for seg. (Etter Dingle et al., 1983 og Beukes, 1970). Den store svarte prikken viser lokaliteten til Witkop I.

2.8 Karoo magmatiske provins

Karoo magmatiske provins består av tykke sekvenser av vulkanske bergarter samt nettverk av magmatiske tverrganger og lagganger, som er korrelert med oppbrytningen av Gondwana i tidlig jura, slev om detaljene om dette er ukjente (Duncan et al., 1997). Ifølge Duncan et al. (1997) foregikk hovedaktiviteten av vulkanismen ved 183 ± 1 Ma. Fortynning av litosfæren ble etterfulgt av magmatisk aktivitet med fokus i Lebombo-Nuanetsi regionen. Deretter fulgte havbunns-spredning og en periode med moderat masseutdøelse av marine invertebrater (Duncan et al., 1997).

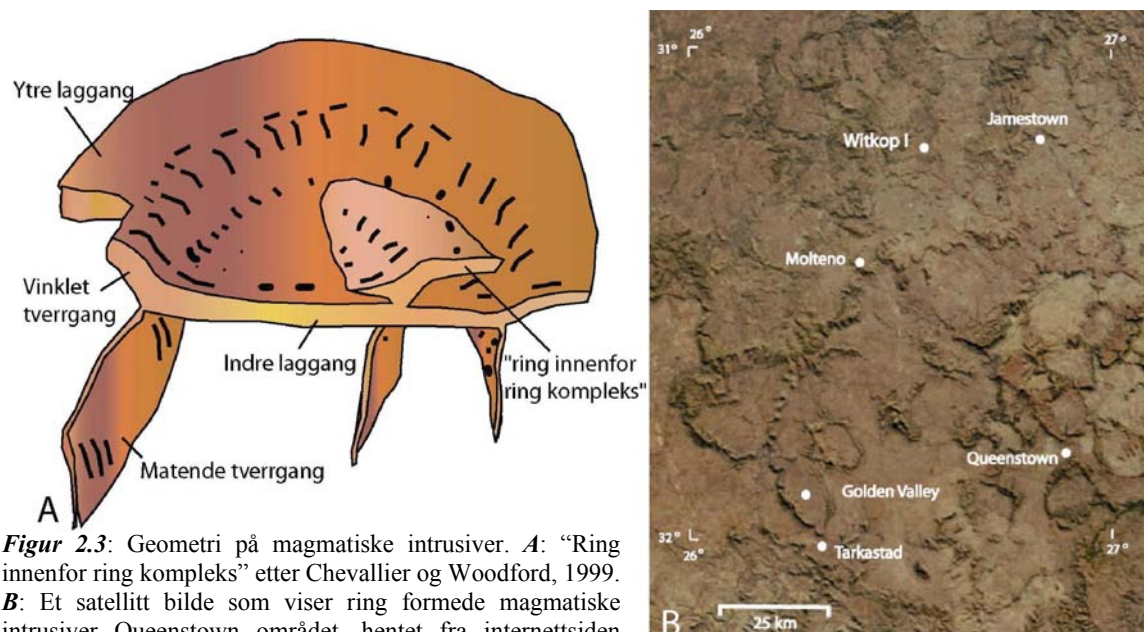
Vidtstrakte vulkanske utbrudd skapte Drakensberg gruppen, overflatebasalter som videre er inndelt i Barkly East formasjonen (nederst) og Lesotho formasjonen (øverst) (Marsh et al., 1997). Overflatebasaltene kom opp på overflaten via flere sprekker som ble matet med magmatisk materiale fra tverrganger som kutter Stormberg sedimentene. Barkly East formasjonen består av uttallige tynne geokjemisk-begrensede enheter der geokjemien varierer nord og sør for 30°S . Lesotho formasjonen består derimot av basaltiske enheter med mindre variasjon i geokjemien.

Lesotho formasjonen utgjør hoveddelen av overflatebasaltene som medfører at Drakesberg gruppen får en tykkelse på minst 1.4 km (Eales et al., 1984). De nederste basaltene ligger over den eoliske Clarens formasjonen, og i de aller nederste 100 meterne av basaltene forekommer det sandsteinslinser som ligger mellom lavastrømmene. Dette er mest vanlig i Barkly East-området. Lavasekvensene i dette området er separert av klastiske horisonter og vulkanoklastiske breksjer (Marsh, 1998). Avsetningen av Clarens formasjonen var dermed ikke avsluttet når de basaltiske lavaene ble ekstrudert.

2.9 Magmatiske intrusiver

De dolerittiske laggangene og tverrgangene i Karoo-bassenget har fått mye oppmerksomhet siden pioner arbeidet av du Toit (1920). Lagganger og tverrganger gjennomtrengte i Stormberg sedimentene ved 183 ± 1 Ma (Duncan et al., 1997). Geokjemiske studier har vist at intrusivene og ekstrusivene har lik sammensetning (Marsh et al., 1997). Laggangene og tverrgangene representerer derfor røttene for de ekstrusive Drakensberg gruppen. Morfologien på dolerittintrusivene i Karoo-bassenget kontrollerer mye landformen i Karoo. På satellittbilder fremtrer intrusivene som ring-liknende strukturer (figur 2.3 B), men i tre dimensjoner likner de faktisk mer på en skål.

Veldig ofte består de dolerittiske ringkompleksene av enda mindre ring enheter, noe som resulterer i det såkalte ”ring innenfor ring” mønsteret (Chevallier og Woodford, 1999) (figur 2.3 A). Nylig arbeid av Chevallier, Goedheart og Woodford (2001) har forbedret forståelsen for måten dolerittiske intrusiver forplanter seg på og på deres morfologi. De har integrert tidligere arbeideres modeller og foreslått en ny modell. De skålformede ringkompleksene som Chevallier, Goedheart og Woodford (2001) har beskrevet består av: en flatt liggende indre laggang (som er mellom 60-100 m tykk) som er den nederst liggende flaten som utgjør bunnen på en skål; en vinklet tverrgang (som heller mindre enn 60°, og er 30-100 m tykk) som utformer ringen; og en ytre laggang som representerer kanten på skålen. Den ytre laggangen kan ha en utstrekning på opp til 100 km fra ringen, og den kan ligge 100 m over den indre laggangen.



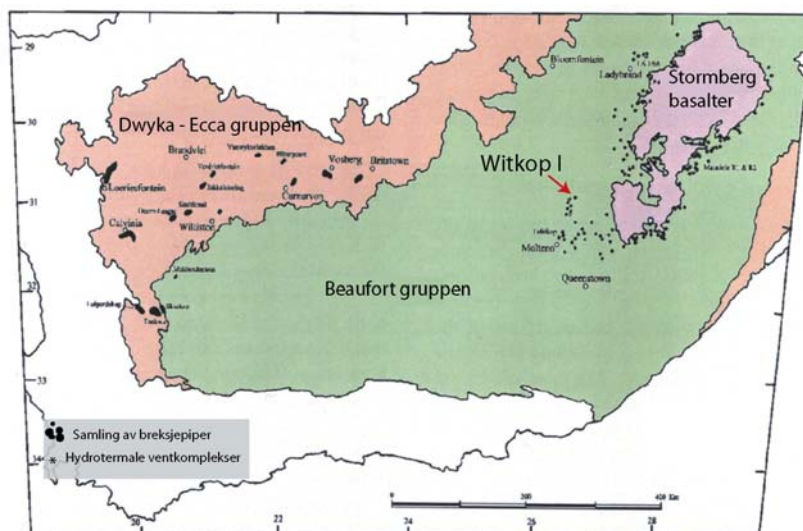
Figur 2.3: Geometri på magmatiske intrusiver. **A:** ”Ring innenfor ring kompleks” etter Chevallier og Woodford, 1999. **B:** Et satellitt bilde som viser ring formede magmatiske intrusiver Queenstown området, hentet fra internett siden www.redtailcanyon.com.

Måten de dolerittiske intrusivene har forplanter seg på i Karoo-bassenget ser ut til å være bestemt av det stratigrafiske nivået. Laggangene har sine foretrukne horisonter og forekommer hyppigst ved kontakten mellom Dwyka- og Eccla gruppene, Prince Albert – og White Hill formasjonen og mellom øvre Eccla- og nedre Beaufort gruppene (Gevers, 1928). Modellen for måten de dolerittiske intrusivene forflytter seg på som er foreslått av Chevallier og Woodford (1999) er empirisk og basert på feltobservasjoner fra Karoo. I denne modellen er det foreslått at den skålformede strukturen ble dannet på denne måten: Den vinklede tverrgangen blir matet av regionale vertikale tverrganger. Den vinklede tverrgangen får en

krumming som følge av samspill mellom vertikale tverrganger som mater den vinklede tverrgangen. Den vinklede tverrgangen passerer videre oppover inn i en flattliggende laggang som løfter opp overliggende sedimenter og propagerer videre utover. En laggang kan propagere horisontalt når det overliggende trykket er mindre enn drivkraften i magmaet. Ut ifra figur 2.6 kan det sees at de skålformede magmatiske intrusiver er konsentrert i den øverste delen av stratigrafien. Dette oppløftet skaper så spenninger i sedimentet som ligger lenger nede slik at det åpnes en glippe. Magmaet propagerer så inn i denne glipen på et lavere stratigrafisk nivå, og bunnen på skålen er dannet. Figur 2.5 viser sammenhengen mellom tverrganger og hydrotermale ventkomplekser.

2.10 Ventkomplekser

Hydrotermale ventkomplekser har vært studert siden begynnelsen av forrige århundre av du Toit (1904) og Gevers (1928) som gjorde mye feltarbeid i Karoo-bassenget. En del ulike termer har blitt anvendt om dette geologiske fenomenet opp gjennom tidene, blant annet: vulkansk vent, vent, diatrem, sandsteinsnakke, vulkansk nakke og vulkansk plugg. du Toit klassifiserte også de hydrotermale ventkompleksene etter type materiale som fylte venten, og han identifiserte to endelegg: de diatremene som inneholdt ubetydelige mengder av magmatiske materialer (sedimentære) og de som inneholdt magmatisk debris (vulkansk). I tillegg oppdaget Gevers (1928) en annen type hydrotermalt ventkompleks, de som hovedsakelig var fylt med leire.

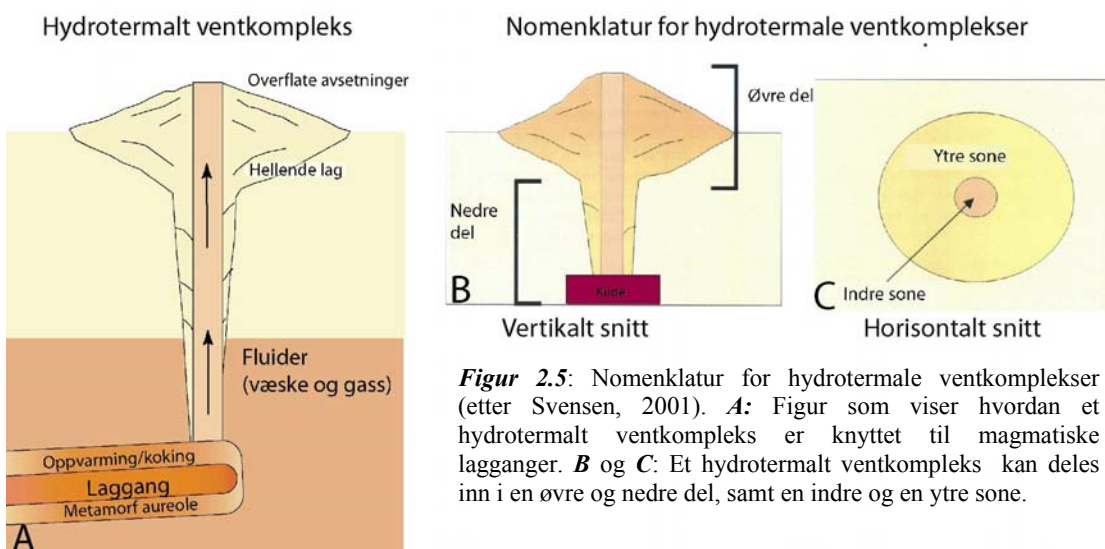


Figur 2.4: Fordelingen av hydrotermale ventkomplekser i Karoo-bassenget. Kartet viser hvorledes breksjepiper er presentert på et lavere stratigrafisk nivå i vestlig del av Karoo-bassenget og hydrotermale ventkomplekser på et høyere stratigrafisk nivå i østlig del (fra Woodford et al. 2001). Legg merke til hvor Witkop I ligger.

Basert på tidligere arbeid av du Toit og Gevers og nylig feltarbeid i Karoo kan hydrotermale ventkomplekser nå deles inn i tre ikke genetiske grupper: sedimentdominerte hydrotermale venter, vulkanskdominerte hydrotermale venter og breksjepiper. Alle disse typene er studert i Karoo-bassenget (figur 2.4).

I denne hovedoppgaven vil et nytt klassifikasjonssystem av Svensen (2001) bli benyttet. Dette klassifikasjonssystemet ble utviklet på bakgrunn av feltobservasjoner av tidligere arbeidere (du Toit, 1904; 1920; Gevers, 1928) og fra tolkninger av seismiske data fra Møre- og Vøring-bassengene i Nordsjøen. Ikke-genetiske termer har vært anvendt så mye som mulig, og eksisterende termer ble benyttet da dette var mulig.

Et ventkompleks er en struktur som består av ulike litologiske, strukturelle og morfologiske enheter. Det blir dannet når lavviskøse materialer blir transportert opp til overflaten. Svensen har definert tre endeledd av ventkomplekser avhengig av type materiale som er transportert opp til overflaten. Det lavviskøse materialet som blir transportert til overflaten kan enten være magma, sedimenter eller fluider. I naturen kan et ventkompleks være en blanding av alle disse endeleddene. Når magma blir transportert opp til overflaten blir det dannet et vulkansk kompleks. Mens transport av sedimenter og fluider danner leirvulkaner eller sandvulkaner avhengig av kornstørrelse. Et hydrotermalt kompleks blir dannet når det transporterte materialet er varme fluider. Et ventkompleks er videre inndelt i en øvre og en nedre sone og en indre og ytre sone (Se figur 2.5 B og C). Den indre sonen er tolket til å representere et tilførselsrør, mens den ytre sonen består av overflatesedimenter og eventuelt strukturert deformert stratigrafi.



Figur 2.5: Nomenklatur for hydrotermale ventkomplekser (etter Svensen, 2001). **A:** Figur som viser hvordan et hydrotermalt ventkompleks er knyttet til magmatiske lagganger. **B** og **C:** Et hydrotermalt ventkompleks kan deles inn i en øvre og nedre del, samt en indre og en ytre sone.

Et *hydrotermalt ventkompleks* er en sedimentvulkan dannet av et hydrotermalt system som genetisk er lenket til en magmatisk intrusiv (figur 2.5 A, Svensen (2001)). De er dannet av varme fluider (faser i væske eller fast form) som frigis og skaper fluidisering og transport av sedimenter til overflaten.

2.11 Observasjoner av ventkomplekser

Figur 2.4 viser fordelingen av de ulike hydrotermale ventkompleksene i Karoo-bassenget. Breksjepiper er vanlig i den vestre delen av bassenget i Ecca gruppen hvor de forekommer i samlinger (Woodford et al., 2001). De vulkanskdominerte og sedimentdominerte hydrotermale ventkompleksene er tilfeldig fordelt i den østre delen hvor de er å finne i den øverste delen av stratigrafien, i Molteno-, Elliot- og Clarens formasjonen (Stormberg gruppen, fra Dingle et al., 1983). Witkop I, som er det hydrotermale ventkomplekset det konsentreres om i denne hovedoppgaven, er plassert i Elliot og Clarens formasjonen som vist på kartet i figur 2.4.

Breksjepiper er konsentrert i vestlig del av Karoo-bassenget, der flere subhorisontale lagganger har intrudert i bunnen av Karoo sedimentsekvensen. Laggangene ligger mellom Dwyka gruppen, Prince Albert formasjonen, Whitehill formasjonen og Tierberg formasjonen (Ecca gruppen). De magmatiske intrusivene har forårsaket epitermal aktivitet og dannet breksjepiper inni Ecca gruppen. Breksjepipene består av gruskornet og grovkornet klaster av basalt eller doleritt, fra < 1mm til flere meter i størrelse (Marsh, 1998). De inneholder også basaltiske vitroklaster, som er moderat vesikulære, med størrelse fra < 1mm til flere cm. De er også peperittiske, der basaltklastene er blandet med leire og sand. Matriksen i breksjepipene består av basaltiske vitriklaster (0-15%) og kvarts og feltspatkorn med noe zirkon og muskovitt (85-100%). Breksjepipene er ofte hydrotermalt omvandlet, og Lock (1978) har funnet bevis for at temperauten har vært rundt 800°C.

Vulkanskdominerte hydrotermale ventkomplekser inneholder basaltisk og pyroklastisk materiale i tillegg til sandstein, og er derfor raskere erodert enn sidebergartene. Den ytre sonen er relativt liten i forhold til den indre sonen (Svensen et al., foreligger).

Sandsteinsdominerte hydrotermale ventkomplekser, som er konsentrert i den østlige delen av Karoo-bassenget, består for det meste av sandstein og sedimentbreksje. Oftest er sandsteinen som fyller ventkompleksene Clarens-liknede i petrografien. Disse ventkompleksene

inneholder sedimentbreksje med litiske fragmenter av sandstein, siltstein og leirstein som er tolket å stamme fra Molteno-, Elliot og Clarens formasjonene (Svensen et al., foreligger.). Den ytre sonen består ofte av tiltede sidebergarter som heller ned mot den indre sonen (Gevers, 1928).

Svensen og Planke (2003) følger visse kriterier for å identifisere hydrotermale ventkomplekser i felten:

- Erosjonsanomalier innenfor Molteno-, Elliot- eller Clarens formasjonen, opp til få hundrede meter i diameter.
- Geometri (sirkulære med en diameter på hundrevis eller tusenvis av m.)
- Anomali i sammensetning (tilstedeværelse av pyroklastiske bergarter og fragmenter av bergarter fra enten et høyere eller et lavere stratigrafisk nivå; tilstedeværelse av en Clarens sandsteinsplugg inne i Elliot formasjonen og tilstedeværelse av oppknuste sedimentære bergarter i en sandsteinsmatriks.
- Indre strukturer (piper, flyte strukturer og sandsteins tverrganger).

2.12 Dannelsesmodeller for hydrotermale ventkomplekser og timing av intrusivene

Hydrotermale ventkomplekser har blitt tolket å være et resultat av freatisk eller freatomagmatisk aktivitet (f. eks. Gevers, 1928; du Toit ,1904; 1912; Dingle et al., 1983; Seme, 1997). Lorenz (1985) forklarer dannelsen av hydrotermale ventkomplekser (det han kaller diatremer) som et resultat av freatomagmatisk aktivitet mellom magma og grunnvann. Han forklarer variasjonen av magmatisk innhold i ventkompleksene med forskjellen på varighet av samspillet mellom magma og grunnvann. Jo mer tilførsel av grunnvann, desto lengere periode med freatomagmatiske eksplosjoner, som resulterer i maar-kollaps. Ved mindre vanntilførsel tillater magmaet å stige til overflaten, som skaper en blanding av pyroklastisk materiale og basalt.

Freatisk eller freatomagmatisk aktivitet kan derimot ikke forklare dannelsen av hydrotermale ventkomplekser som er dannet på nivåer i stratigrafien som er under det kritiske punktet for vann (Jamtveit et al., 2004). Dog, det fins en annen tilleggsforklaring på oppbygningen av poretrykket som medførte dannelsen av hydrotermale ventkomplekser: modning av organisk materiale i kontaktaureolene kan føre til produksjon av karbonholdige gasser (Svensen et al., 2004). Modning av organisk materiale skaper en rask økning i trykkoppbygging og freatiske eksplosjoner, som videre resulterer i dannelse av en breksjekanal til overflaten. Breksjepipene

i den vestlige delen av Karoo-bassenget har sine røtter i organiskrike skifere, noe som bekrefter at ventkomplekser er genetisk lenket til metamorfe aureoler. I tillegg viser seismisk data fra Vøring-bassenget (Jamtveit et al., 2004) at hydrotermale ventkomplekser er lenket til vinklede lagganger og tverrganger på et lavere stratigrafisk nivå. Dermed kan røttene til de hydrotermale ventkompleksene starte på lave nivåer i sedimentbassenger.

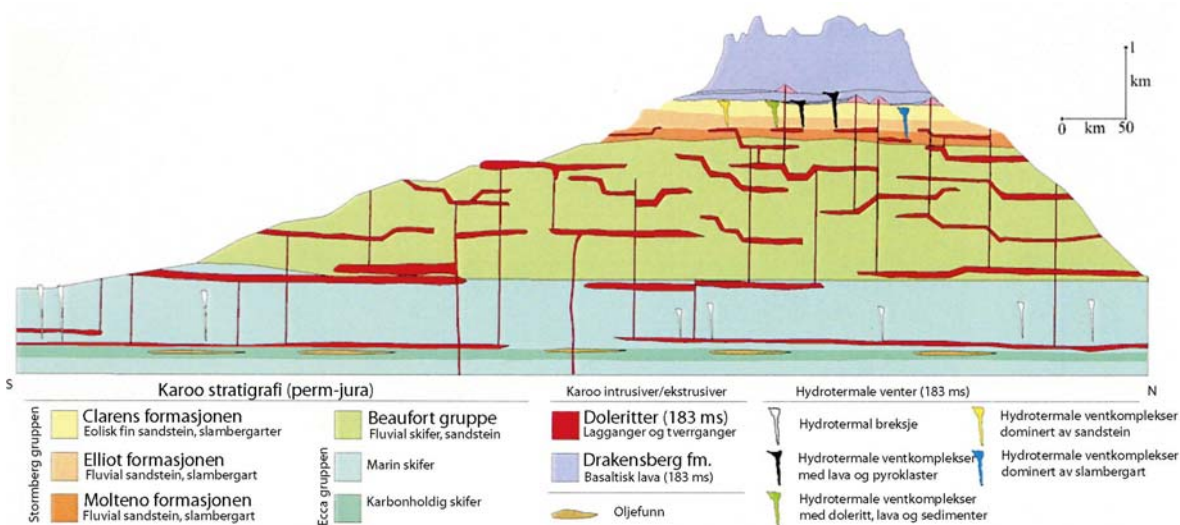
Hvorvidt Stormberg gruppen var konsolidert eller løst sediment da Karoo-bassenget ble gjennomtrengt av magmatiske intrusiver er noe tvetydig. Molteno formasjonen ble avsatt ca. 40 Ma før vulkanismen, og var derfor mest sannsynlig konsolidert. Feltobservasjoner av Marsh (1998) kan tyde på at Elliot- og Clarens formasjonen både var og ikke var konsolidert. Observasjoner som tyder på at Clarens sanden var løst gjelder blant annet funn av breksjer der isolerte kvarts- og feltspatkorn utgjør matriksen, mens klastene består av kantete og vesikulær basalt og bomber. I tillegg er det registrert stratifisert eolisk sand fra Clarens formasjonen som fyller nedsenkningsstrukturene sammen med basaltisk lapilli (Marsh, 1998). Dette har kommet etter kollapsen av komplekset. Observasjoner som viser at Elliot formasjonen ikke var konsolidert er blant annet funn av en viskøs-plastisk blanding av basalt og sediment/leire fra Elliot. Det fins derimot også feltobservasjoner som indikerer at Elliot- og Clarens sedimenter også har vært litifisert på det tidspunktet vulkanismen inntraff. Det er funnet peperitter med litiske klaster av Elliot- og Clarens sand (Marsh, 1998).

De organiske karbon verdiene i Karoo-bassenget er størst innen Dwyka og Ecca skifrene. Verdiene er størst i den nordlige (gjennomsnittlig > 5 %) og den sydlige (gjennomsnittlig 2-5%) delene av Karoo-bassenget. Men karboninnholdet minker mot de sentrale delene av bassenget (gjennomsnittlig 0,5-2% og mindre enn 0,5 %) (Rowell og de Swardt, 1976). Ifølge Rowell og de Swardt (1976), kan Molteno skifrene faktisk ha fungert som kilde for oljen som er funnet på overflaten rundt den sydlige grensen av Lesotho i stedet for Ecca skifrer. I disse tilfellene er oljen funnet i forbindelse med diatremer som ser ut til å tappe underliggende reservoarer (Wopfner, 1974).

2.13 Oppsummering

Hydrotermale ventkomplekser er hyppig fordelt i den øverste delen av stratigrafien i Karoo-bassenget, Sør-Afrika. De er dannet som et resultat magmatiske intrusiver rundt 183 ± 1 Ma (Duncan et al., 1997). Hydrotermale ventkomplekser er relatert til skålførmede tverr- og lagganger som er plassert på grunne dybder i bassenget. Magmatiske intrusiver har stor påvirkning på fluidstrømning og noen ganger får trykket lave verdier høyt oppe i stratigrafien.

Koking kan forekomme ved lavt trykk slik at fluider kan ekspandere eksplosivt som resulterer i en fluidiserende prosess. Fluidiseringen kan også starte som følge av at gasser, som drives ut av magmaet, reagerer med porevannet, eller ved at poretrykket økes som følge av modning av organiske materialer. Det fluidiserte materialet finner sin vei oppover mot overflaten hvor det kan bli spydd ut og dannet en sedimentvulkan. Pga. mangel på materiale i undergrunnen kan hele komplekset kollapse og danne diatremer og maarer. Mange eksempler fra seismisk data offshore Norge har vist denne sammenhengen der hydrotermale venter er koplet til metamorfe aureoler rundt de magmatiske intrusivene. Når et hydrotermalt ventkompleks først er dannet i et sedimentbasseng kan den senere ha stor påvirkning på fluidets migrasjonsmønster ettersom det utgjør en porositets- og permeabilitetsanomali. Hydrotermale venter kan fungere som sekundære migrasjonsveier for hydrokarboner og andre fluider. Figur 2.6 er et skjematisk snitt gjennom Karoo-bassenget som illustrerer hvordan disse geologiske fenomenene henger sammen.



Figur 2.6: Et skjematisk snitt gjennom Karoo-bassenget som illustrerer hvordan skålformede magmatiske intrusiver er konsentrert øverst i stratigrafien og deres forhold med hydrotermale ventkomplekser. Delvis basert på Chevallier et al. (2001) og Woodford et al. (2001).

KAPITTEL 3 METODIKK OG TEORI**3.0 Metodikk og teori**

I alt 53 prøver er analysert med tanke på å løse problemstillingene i denne hovedoppgaven. For å finne fluidkilde og temperatur for dannelse av kalsitter ble det benyttet stabile lette isotop-analyser mens hastighetsanalyser ble benyttet på fire prøver for å finne forskjeller i petrofysiske egenskaper til de ulike litologiene for så videre å sammenlikne resultatene med petrografibeskrivelser. Stabile lette isotopanalyser ble utført på Institutt for Energiteknologi (IFE) på Kjeller, mens analyser på seismiske hastigheter ble utført på Norsk geoteknisk institutt (NGI). For å karakterisere effekter av diagenese i prøvene ble det benyttet sveipe elektronmikroskop (SEM) og katodeluminesens (CL) for å studere teksturen og de petrografiske egenskapene, og røntgen diffraktometri (XRD) for identifisering av leirminerale. Alle de sistnevnte undersøkelsene ble utført ved Institutt for geofag, Universitetet i Oslo (UiO). Alle prepareringer av tynnslip ble også utført ved Institutt for geofag, bortsett fra seks prøver som ble sendt til IFE.

3.1 Sedimentpetrografi

For å studere sedimentpetrografi ble det for det meste benyttet tynnslip uten dekkglass i et sveipe elektronmikroskop (SEM). På SEM ble det også benyttet et katodeluminesensmikroskop (CL) for å identifisere kvartspåvekster. For studie av kalsittutfellinger ble et CLmk3A-katodeluminesens for optisk mikroskop benyttet. Det ble utført XRD for bestemmelse av sammensetningen av lerimineraler. I tillegg ble det utført bulkanalyser som kan gi en semikvantitativ analyse for bestemmelse av mineralsammensetningen i prøven. Optisk mikroskop (OM) ble i liten grad benyttet for teksturstudie ettersom prøvene er finkornige.

3.2 Preparering av tynnslip

Alle prøvene er sagt opp med en i Petrothin tynnslipsag ved Institutt for geofag, slik at de fikk en tykkelse på ca. 1 cm. Deretter ble de overlevert til Siri Simonsen, Malcolm Stuart Lynn og Johny Skrårueter ved Institutt for geofag som fullførte prepareringen. De benyttet seg av en Logitech LP50 slipemaskin og en Buehler phoenix 4000 polermaskin. Alle prøvene ble vakuumimpregnert med blå epoxy, bortsett fra prøvene KO1S-2, KO3HS-27 og KO3HS-29.

3.3 Sveipe elektronmikroskop (SEM)

Teori

SEM-analyser er en teknikk for kjemiske analyser på små prøver i fast form der Röntgenstråler eksiteres av en fokusert elektronstråle. X-strålene får en karakteristisk linje for hvert element, og disse linjene identifiseres på bakgrunn av deres bølgelengder (foton-energi). Ved å måle intensiteten på disse linjene, kan man også bestemme konsentrasjonen av elementet (kvantitativ analyse). SEM er spesielt tilrettelagt for å studere i bildeform, og dermed er det et utmerket instrument for å studere tekstur. Et bilde produseres ved å skanne strålene slik at signaler fra elektrondetektoren oversendes til en skjerm (Moore og Reynolds, 1997). Mineralene ble identifisert på basis av morfologi og toppene i EDX-spektret (energidispersive røntgen analysen).

Petrografistudiet består for det meste av BSE-analyser av karbonbelagte polerte tynnslip. Tilbakespredte elektroner (BSE) er en andel av elektroner som har en større innfallsvinkel en 90° slik at de sendes tilbake fra overflaten til målet. Andelen av tilbakespredte elektroner er meget avhengig av materialets atomnummer ettersom sannsynligheten for en stor innfallsvinkel øker med økende atomnummer. Resultatet gjengis i ulike grader av gråtoner på skjermbildet ettersom atomnummeret øker. Jo lysere bildet på skjermen er, desto tyngre er atomnummeret.

Metodikk

Stubbeprøver ble gullbelagte og studert i sekundælektron bilde, "Secondary Electron Image" (SEI). Elektroner som spyttes ut fra prøven pga. bombardering av elektroner kalles sekundære elektroner. De har mye lavere energi enn tilbakespredte elektroner. Ved å studere en gullbelagt stubbe i SEI vises overflatetopografien til prøven, noe som er et godt hjelpemiddel for studie av kornform og morfologi på autigene mineraler.

Petrografistudiet er i hovedsak utført ved hjelp av SEM ved Institutt for geofag under assistanse fra avdelingsingeniør Berit Løken Berg og overingeniør Turid Winje. SEM på instituttet er av typen JEOL JSM-840, med Link ISIS mikroanalyse system (EDS- Energy Dispersive X-ray System). SEM er utstyrt med detektorer for sekundælektroner (SEI), tilbakespredte elektroner ("back scattered electron detector" (BSE)), katodeluminescens (CL) og germanium ultratynnvindu røntgendetektor for energidispersive røntgen analyser (EDX-analyser) og element-mapping (kartlegging).

Usikkerheter med metoden (Welton, 1950):

- Det er ikke i alle tilfeller der høyden på toppen i EDX-spektret tilsvarer konsentrasjonen, og dette gjelder for endeledene høye og lave atomnumre. For

eksempel vil høyden på toppene for Na- og Mg-toppene alltid være reduserte relativt deres konsentrasjon pga. adsorpsjon av lavenergi X-stråler i berylliumvinduet av detektoren.

- Elektronstrålen kan trenge igjennom veldig tynne mineraler slik som leirmineraler, og dermed kan analysene representere andre mineraler som ligger under det mineralet som er ønsket analysert. Utfallet kan også være en analyse som representerer en blanding av flere mineraler.
- På SEI-analyser av stubber kan elektronstrålen komme borti mineraler som ligger i nærheten av det mineralet som ønskes å analyseres, og dermed kan EDX-spektret bli forstyrret og representere en blanding av ulike mineraler.

3.4 Katodeluminesens (CL)

Teori

Prinsippet bak CL-teknikken går ut på at noen mineraler lumineserer i bestemte farger når de blir utsatt for katodestråling i et evakuert kammer. De innkommende elektronene hever elektronbindingene til et høyere energinivå, og når de faller tilbake til deres originale energinivå frigis overskuddsenergien som en mengde lys. Forurensninger av atomer (f.eks. Mn) eller defekter i krystallgitter kan virke som aktivatorer som medfører heving til et høyere energinivå. Typiske CL-farger for kalsitt er oransje, mens mer Mg-holdige kalsitter er mer rødaktige i fargen. Ved CL-studier på SEM kan man skille mellom detriale og autigene faser av kvarts ved at det detriale kornet blir lysere enn den autigene påveksten, (f. eks. Dypvik, H. (2001), Saigal, GL342).

Metodikk

CL-studier ble benyttet på to ulike CL-mikroskoper. Ved studier av kvarts-påvekster ble CL på SEM benyttet, og ved studier av kalsittutfellinger ble det benyttet et Nikon Labophol mikroskop tilknyttet et Nuklide katodeluminescope. CL-studiene ble utført hovedsaklig for å skille autigene faser fra detriale. Erfaringen var at studier av stubber på SEM gav gode tilleggsinformasjon for kvartspåvekster. Det ble benyttet CL-studier på prøver som inneholdt kalsitt for å se på eventuelle soneringer i sementen som indikerer endringer i porevannskjemien under utfellingen.

Usikkerhet med metoden:

- Man bør ikke tolke geokjemien ut ifra CL-studier. Men CL kan benyttes for å si noe om teksturen og petrografien.

3.5 Røntgen diffraktometri (XRD)

Teori

Prinsippene bak XRD som en metode for bestemmelse av mineralinnhold i en prøve går ut på at mineraler er bygd opp av gitterplan som sammenfaller med bølgelengden på strålen som

diffrakteres fra en innfallende stråle. Diffraksjonsvinkelen kan regnes ut ved hjelp av Braggs likning:

Likning 3.1: $2d\sin\theta = n\lambda$, der d er avstanden mellom gitterplanene i leirmineralet (\AA), θ er diffraksjonsvinkelen, n er et helt tall og λ er bølglengden til røntgenstrålen.

I og med at hvert mineral gir karakteristiske diffraksjoner, kan man identifisere mineralet ved å måle θ eller d -verdien. Analysene som ble utført i denne oppgaven ble identifisert ved å bruke typiske θ - eller d -verdier hentet fra Brown og Brindley (1980) og Ramm (1991). Noen refleksjoner var dessverre ikke mulig å finne ut av, og disse antas å være støy fra interfererende bølger.

Metodikk

Det ble utført XRD-analyser på 25 prøver for å identifisere og kvantifisere leirmineralogien (orienterte prøver) og for å bestemme den total-mineralogiske sammensetningen av prøvene (urorienterte prøver). Alle analysene ble utført ved Institutt for geofag, Universitetet i Oslo, under veiledning av avdelingsingeniør Berit Løken Berg. Instrumentet som ble benyttet til disse formålene var en Philips X'pert MPD, røntgen diffraktometer og resultatene ble bearbeidet med en Philips X'pert programpakke.

Prøvepreparering: For *uorienterte* bulkprøver ble prøvematerialet først knust til grus i en metallmørtel og siden pulverisert i slyngmølle i ca. 3-4 min. Det ble vasket med sprit mellom hver prøveknusning. Deretter ble pulveret lagt i en aluminiumsbeholder og siden ble dette banket fast i en "bankemaskin" laget ved Institutt for geofag. Uorienterte bulkprøver ble analysert mellom 2 og 50°, og deretter analysert i et X'pert automatisk pulver diffraktometer. *Orienterte* prøver av leirmineralfraksjon (< 2 mm) ble forberedt på denne måten; først ble prøvematerialet (ca. 400 g) pulverisert på samme vis som for bulkprøvene, deretter ble de lagt i sylindereholdere som var over 50 cm høye. Disse sylindereholderne ble fylt med ionisert vann opp til et merke på beholderen. Prøvepulveret ble så godt blandet med vannet med en rørestav. Prøvematerialet ble så stående over natten slik at de tyngste partiklene kunne falle ned på bunnen. Falltiden avhenger temperaturen i rommet, og den ble bestemt ut fra en tabell. Deretter ble leirmineralene fraksjonert fra steinprøven ved å suge ut de øverste 30 cm fra sylindereholderen. Prøvene som på dette stadiet inneholdt vann, ble videre sentrifugert slik at man kun satt igjen med leirmineralfraksjonen. Det gjenværende prøvematerialet ble så overført på en silikaplate slik at det fikk en jevn overflate. Prøvene sto så over natten og tørket før de ble videresendt til XRD-laboratoriet for kjøring i et røntgen diffraktometer.

Usikkerheter med metoden:

- Kvaliteten på prøveprepareringen virker inn på resultatene. For mye knusning kan ødelegge krystallstrukturen, mens for lite knusning kan skape innhomogene kornstørrelser i prøvebeholderne. I sistnevnte tilfelle kan mineraler med større motstand mot knusning (aksessorier for eksempel) bli underrepresentert i analyse materialet.
- Noen mineraler har refleksjoner som kamufleres av andre mineralers topper. Muskovitt og illitt har for eksempel meget like topper, og det kan være vanskelig å skille dem.

3.6 Seismiske hastigheter

Teori

To typer bølger kan propagere gjennom et materiale med fast elastisk materiale; P-bølgen og S-bølgen. P-bølgen er en elastisk bølge der partikkelbevegelsene er parallell med retningen bølgen propagerer. S-bølgen ("shear"), derimot, er en elastisk bølge der partikkelbevegelsene er vinkelrett til retningen som bølgen propagerer. Hastigheten (v) som disse bølgene propagerer er gitt ved (hentet fra Kearey og Brooks, 1995):

Likning 3.2:

$$V = [\text{passende elastisk modulus på materialet} / \text{tetthet på materialet}]^{1/2}$$

De elastiske modulusene kan være "Bulk modulus" (K), som beskriver elastiske stoffers motsand mot endring av volum (innkompressibilitet).

Likning 3.3:

$$K = \Delta \text{hydrostatisk stress} / \Delta \text{volum strain}$$

Skjærmodulus er en annen elastisk modulus som beskriver motstanden som elastiske stoffer utøver på skjærplanene (rigiditet).

Likning 3.4:

$$\mu = \text{skjærstress } \sigma_s / \text{skjærstrain } \gamma$$

P-bølge hastigheten er en funksjon av bergartens tetthet, bulk modulus (innkompressibilitet) og skjær modulus (rigiditeten):

Likning 3.5:

$$V_p = [(k + 4\mu/3)/\rho]^{1/2},$$

der V_p er hastigheten på P-bølgen, k er bulk modulus, μ er skjærmodulus og ρ er tettheten.

S-bølge hastigheten er funksjon kun av skjær modulus og tettheten på bergarten:

Likning 3.6:

$$V_s = (\mu/\rho)^{1/2},$$

der V_s er S-bølge hastigheten, μ er skjærmodulus og ρ er tettheten på bergarten.

Ettersom fluider ikke har noe skjærstyrke vil S-bølgen kun forplantes gjennom matriksen på bergarten og ikke gjennom materialet i porerommene (Omnes, 1978).

Pickett (1963) viste hvordan V_p/V_s kan fungere som en litologi-indikator med V_p/V_s -verdier for karbonatbergarter på 1.9, dolomittbergarter på 1.8, kalkrike sandsteiner på 1.7 og for rene sandsteiner en verdi på 1.6. Siden er det utført flere laboratorieforsøk for å forbedre forståelsen på graden de ulike geologiske faktorene kan påvirke seismisk hastighet. Det har vist seg at sandsteiner kan ha V_p/V_s -verdier fra 1,5 (lav porøsitet)-1,75 (stor porøsitet). Skifre har V_p/V_s -verdier mellom 2.4-2.7. Seismiske hastigheter er påvirket av flere geologiske faktorer som porøsitet, poregeometri, sprekkegeometri, porefluid, bulk tetthet, effektiv stress, begravning, type og grad av sementering og dannelsesstemperatur (McCormack et al., 1985). Hvis de seismiske hastighetene og tettheten er kjent kan man dermed få informasjon om de petrofysiske egenskapene til bergarten. Tabell 3.1 er en oversikt over forventede kvalitative resultater i V_s og V_p .

Tabell 3.1: En liste over forventede kvalitative hastighetsresultater ved laterale variasjoner innenfor en formasjon, hentet fra McCormack et al., 1985.

<i>Lateral variasjon i formasjonen</i>	<i>Forventede kvalitative resultater</i>		
	V_p	V_s	V_p/V_s
<i>PORØSITET</i> økning minking	minking økning	stor minking stor økning	økning minking
<i>FLUIDMETNING</i> saltvann til olje saltvann til gass olje til gass	liten økning stor minking stor minking	liten økning liten økning liten økning	nesten konstant minking minking
<i>FACIES</i> % skifer i bergarten økning minking	minking økning	stor minking stor økning	økning minking

Fluidmetning: P-bølger er betydelig mer sensitiv for fluidmetning enn S-bølger. Gass er mindre kompressibel enn fluider slik at V_p minker betraktelig med økt gassinnhold. Dermed kan V_p/V_s fungere som en indikator på hydrokarboner (Ensley, 1984). Bulk og skjær modulus er lik i tørre sandsteiner, og ved vanntilførsel øker bulk modullusen (Castagna et al., 1985). Dog, bergarter med høyt leireinnhold kan mykne nettverket i bergarten og redusere den elastiske modullusen.

Porøsitet og leireinnhold: Økt porøsitet gir økt V_p/V_s -forhold, og det samme gjelder for økt leireinnhold. V_p/V_s er mindre sensitiv for variasjoner i leireinnhold enn for variasjoner i porøsitet, dog variasjonen i leireinnhold kan være større slik at V_p/V_s hovedsaklig kan være

avhengig av leireinnholdet (Castagna et al., 1985). Leireinnhold minker skjær modulus på bergartsmatriksen, slik at V_s minker mer enn V_p , som totalt sett øker V_p/V_s .

Pore- og sprekkegeometri: Veldig flate sprekker, selv ved små konsentrasjoner, kan forsterke bulk elastisiteten som gir større V_p/V_s -verdier. Aspektforholdet (lengde/bredde på sprekken eller poren) har sterkere påvirkning på V_p/V_s enn de elastiske egenskapene til mineralene som utgjør matriksen. Sandsteiner med sfæriske porerom har derimot lavere V_p/V_s -verdier og er mer avhengig av konsentrasjonen (porøsiteten) (Tatham, 1982).

Metodikk

De fire prøvene KO1S-31,-51, -3 og -37 ble levert til NGI for hastighetsanalyser av P-bølger og S-bølger samt analyse av bulk tetthet, porøsitet og korntetthet. Analysene ble utført av Toralf Berre og Trude Ørbekk som brukte følgende prosedyrer (Trude Ørbekk, pers. komm.):

Bulk tetthet, porøsitet og korntetthet: Prøvene ble veid, deretter kokt i avionisert vann i 6-7 timer. Etter koking ble prøvene veid på vekt, deretter neddykket veiing i avionisert vann. Slik fant man bulk tettheten fra mettet vekt, og neddykket volum og vekt. Prøvene ble tørket ved 105 °C helt til tørrvekten ikke endret seg. Porøsitet og korntetthet ble bestemt fra tørrvekt, volum og mettet vekt.

Hastighetsmålinger av P- og S-bølger: Det ble drillert ut sylindriske plugg med 3 cm i diameter og 7 cm i lengde. Alle pluggene ble kokt i 6-7 timer før innbygging i treaksialselle og påføring av omslutningstrykk. Ved ønskede trykk ble en sinusbølge sendt gjennom prøven fra topp til bunn. Fra oscilliskopet fant man "point of first arrival", dvs. bølgens ankomsttid. Med ankomsttid og lengde på prøve beregner softwaren V_s og V_p og korrigerer for forsinkelser gjennom utstyr. Forsinkelser gjennom utstyr finner man ved å måle hastigheten gjennom utstyret uten prøve ved ca 20 MPa omslutningstrykk.

3.7 Stabile lette isotop-analyser

Teori

Stabile lette isotoper, slik som ^{18}O - ^{16}O og ^{13}C - ^{12}C , har lav atommasse. Derfor blir forskjellen på atommassen mellom den sjeldne (tunge) og den vanlige (lette) isotopen stor (Friedman og O'Neil,

1977). Av den årsaken fraksjoneres isotopene både via fysiske prosesser (pga. kinetiske energiforskjeller på isotopene), og kjemiske prosesser (pga. ulik bindingsenergi til isotopene).

Verdien på den relative isotopanrikningen, δ -verdien, måles i forhold til en standard og uttrykkes slik (Buchardt, 1983):

Likning 3.7:
$$\delta_X = \left(\frac{R_X - R_{STD}}{R_{STD}} \right) 10^3$$
 , der R_X er $(C^{13}/^{12})_X$ eller $(O^{18}/O^{16})_X$, og R_{STD} er det korresponderende forholdet for en standard.

R er alltid forholdet mellom den sjeldne (tunge) og den vanlige (lette) isotopen. Negative δ -verdier tilsvarer en utarming av den tunge isotopen i forhold til standarden, mens positive δ -verdier tilsvarer en anrikning av den tunge isotopen. Standarden som δ -verdien måles mot kan enten være SMOW (Standard Mean Ocean Water) eller PDB (Pee Dee Belemnite). PDB-standarden er alltid benyttet ved bestemmelse av paleotemperatur vha. oksygenisotopanalyser av karbonatmineraler. SMOW-standarden er for det meste benyttet for vannprøver og for silikatmineraler. Fraksjoneringsfaktoren for isotoper mellom to substanser, A og B, er definert slik:

Likning 3.8:
$$\alpha_{A-B} = \frac{R_A}{R_B}$$
 , der α er fraksjoneringsfaktoren.

Fraksjoneringsfaktoren er relatert likevektskonstanten, K, for isotope utvekslingsreaksjoner på følgende vis:

Likning 3.9:
$$\alpha = K^{1/n}$$
 , der n er antall atomer som blir utvekslet i reaksjonen.

Når $n=1$, vil α -verdier ligge på 1.00x. Matematisk er $10^3 \ln(1.00X) \cong X \cdot 10^3 \ln \alpha$ varierer med $1/T^2$ og $1/T$ ved henholdsvis høye- og lave temperaturgrenser (Biegeleisen og Mayer, 1947).

Fraksjoneringen av *oksygenisotoper* skjer gjennom flere temperaturavhengige likevektsreaksjoner. Likning 3.10 er den såkalte ”oksygenisotop-paleotemperatur-relasjonen” for kalsitt. Det er en empirisk likning som sammenknytter utfellingstemperaturen, isotopkonsentrasjonen i kalsitten, δ_c , og isotopkonsentrasjonen i formasjonsvannet, δ_w (Epstein et al., 1953):

Likning 3.10:
$$T^{\circ}C = 16,9 - 4,21(\delta_c - \delta_w) + 0,13 (\delta_c - \delta_w)^2$$
 , der $\delta_c = \delta^{18}O_{PDB}$ (kalsitt) og $\delta_w = \delta^{18}O_{SMOW}$ (formasjonsvannet)

Man må altså kjenne til $\delta^{18}\text{O}$ for kalsittfasen og $\delta^{18}\text{O}$ for formasjonsvannet for å kunne regne ut dannelsesstemperaturen. $\delta^{18}\text{O}_c$ er kjent utifra analysene fra IFE. Derimot er $\delta^{18}\text{O}_w$ ukjent.

Fraksjoneringen av *karbonisotoper* bestemmes av karbonforbindelsens oksidasjonstilstand. ^{13}C anrikes i oksiderte forbindelser fremfor reduserte forbindelser, og den tyngste isotopen konsentreres i den tyngste molekylene. ($\text{CH}_4 < \text{CH}_2\text{O} < \text{CO}_2 < \text{CaCO}_3$). Ved fotosyntesen reduseres kullstoffet i atmosfærisk karbondioksid eller oppløst karbondioksid til organiske forbindelser. Dette medfører til en utarming av ^{13}C i endeproduktet (Buchardt, 1983).

Metodikk

Prøvene som det ble utført $\delta^{18}\text{O}$ - og $\delta^{13}\text{C}$ -analyser på, ble utvalgt på basis av saltsyretesting. Deretter ble de knust i en agatmørtel, og det ble benyttet sprit for å rense mørtelen mellom hver prøve. En påknust prøve på ca. 100 mg ble videre sendt til IFE. Først ble organisk materiale fjernet ved å varme opp prøven i vakuum ved 25°C . Det frigjorte CO_2 ble så kryogenisk pulverisert og overført til en MAT 251 isotopforhold massespektrometer med to innløp og en trippel kollektor for bestemmelse av $\delta^{18}\text{O}$ - og $\delta^{13}\text{C}$. Nøyaktigheten for $\delta^{13}\text{C}$ er 0,1 ‰ og for $\delta^{18}\text{O}$ 0,2‰ (Rapport fra IFE).

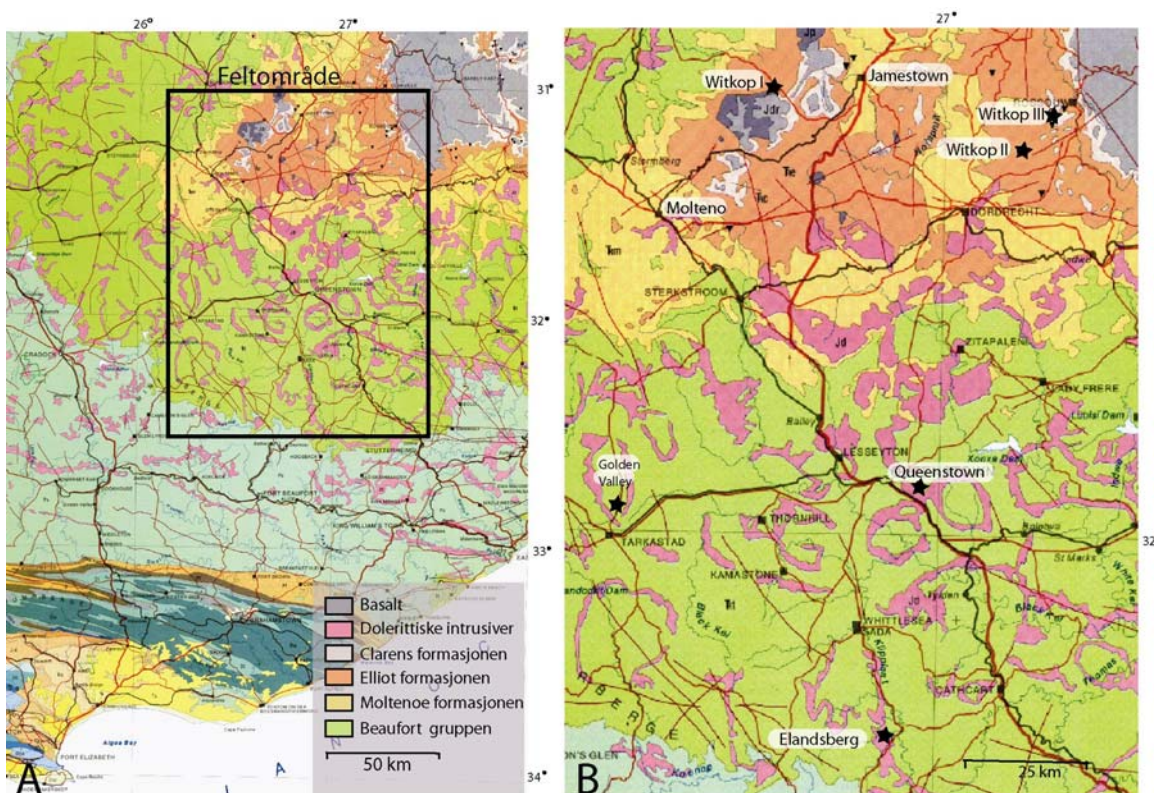
Usikkerheter med metoden

Flere generasjoner av kalsittmineraler kan være tilstede i prøven. I tillegg har analyseresultatet fra massespektrometret en feilmargin på 2‰ (Rapport fra IFE).

KAPITTEL 4 FELTARBEID I KAROO

4.0 Feltområde

Det utvalgte feltområdet for denne hovedoppgaven ligger nordøst for Brosterlea vulkanske kompleks mellom Molteno og Jamestown (øst: 26, 36.916, syd: -31 08, 590) (figur 4.1). Feltarbeidet ble utført på et hydrotermalt ventkompleks som er kalt Witkop I. Fire dager i løpet av mars måned, 2001, ble brukt for å innhente bergartsprøver fra dette komplekset og fra det omliggende området.

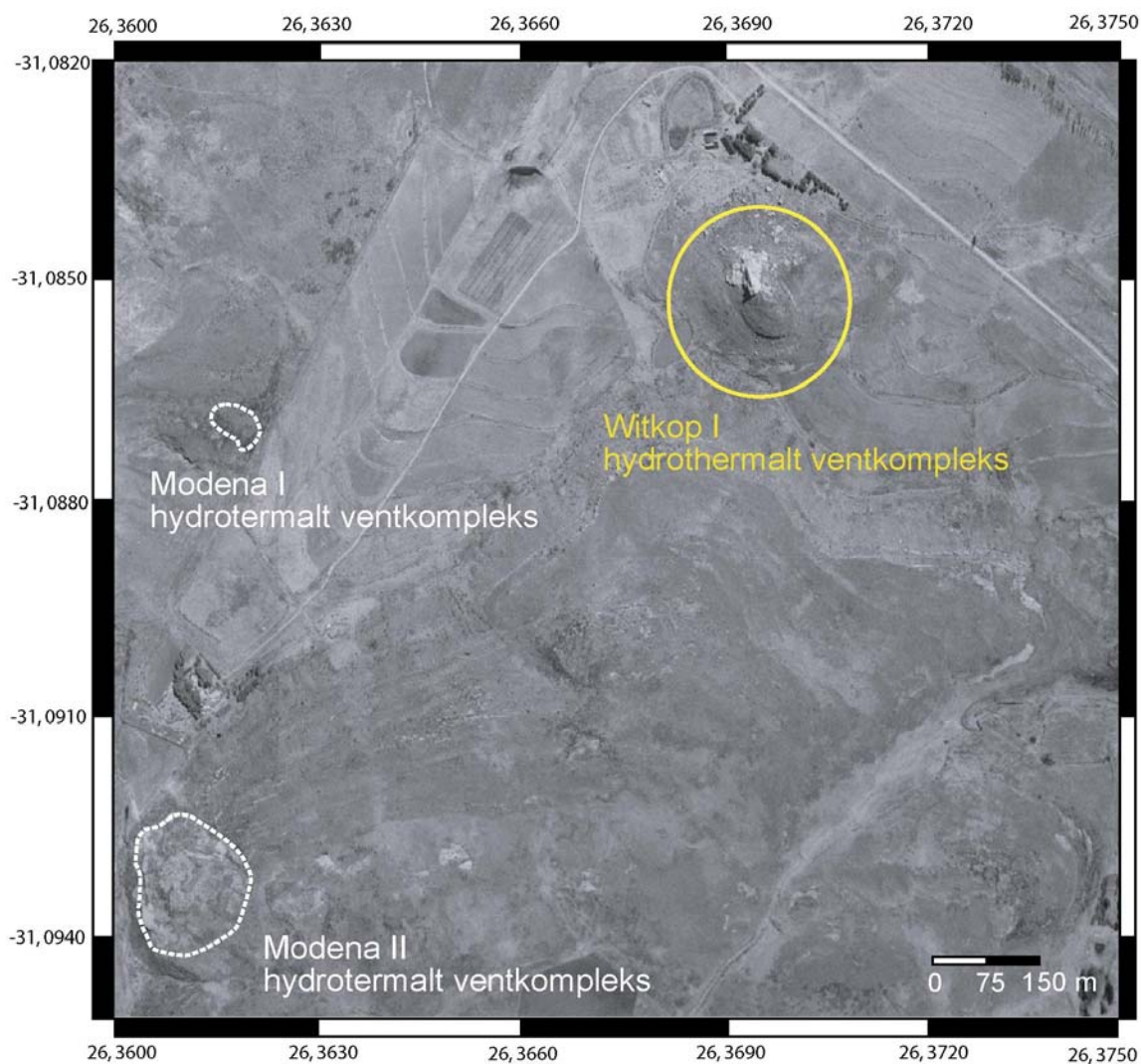


Figur 4.1: Et geologisk kart over feltområdet i Karoo-bassenget, Sør-Afrika. **A:** Et regionalt geologisk kart, (Keyser, 1997). **B:** En større forstørrelse over området innenfor rammen i A, som viser lokalitetene som ble besøkt under ekskursjonen til Karoo i mars 2001.

For kartlegging av Witkop I ble det benyttet en Garmin Etek GPS med en nøyaktighet på ± 4 m sammen med et flyfoto fra Chief Directorate of Surveys and Mapping, Cape Town. Prøvene ble innhentet ved hjelp av en geologhammer og meisel, og koordinatene til prøvelokalitetene ble registrert av GPS. Litologiske logger ble målt ved hjelp av et barometer og en 1,5 m lang målestokk. Strøk og fall målinger ble utført ved hjelp av et Suunto globalt kompass. Forholdene for prøvetaking var generelt gode, men feltområdet er meget forvitret. Overflatebergarten i ventkomplekset er meget hard og den virker glinsende når sollyset

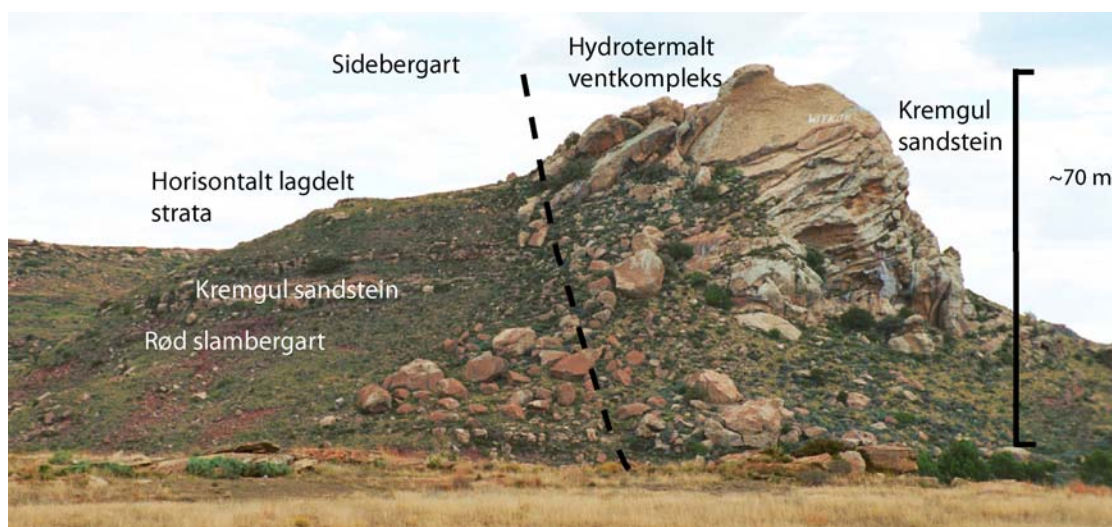
skinner på den. Det ble forsøkt å unngå de øverste 5-10 cm så godt som mulig for å få prøver som var minst mulig forvitret.

Et hydrotermalt ventkompleks har både en indre og en ytre sone der den indre sonen representerer en tilførselskanal, og den ytre sonen utgjør bergartene som ligger rundt den indre sonen, som ofte er påvirket av prosessene som pågår i den indre sonen. Den ytre sonen består ofte av sedimentære lag som heller innover mot den indre sonen, noe som er tolket å være et resultat av kollapsen av komplekset. På et flyfoto vil dette utarte seg som en ring med innoverhellende lag mot den indre sonen (jmf. kapittel 2.11). Det hydrotermale ventkomplekset Witkop I har ingen tydelig ytre sone. Derfor ser man heller ingen ring rundt den indre sonen på flyfotoet over Witkop I (figur 4.2).



Figur 4.2 Et flyfoto over feltområdet rundt Witkop I. Modena I og Modena II hydrotermale ventkompleksene er også tilstede på fotoet. Koordinatene er tegnet inn på basis av det geologiske kartet i figur 4.4. Flyfototet er fra Chief Directorate, surveys and mapping, Department of Land Affairs, Cape Town.

Witkop I er et hydrotermalt ventkompleks som er godt blottlagt, og det kutter tydelig stratigrafien fra den øvre Elliot formasjonen. Elliot formasjonen består av horisontalt lagdelt strata som er dominert av rødfargede fluvialt avsatte slambergarter. Den øvre delen av sekvensen består av vekslende lag av rødfarget slambergart og fin- til medium kornet kremgul sandstein pga. den økende eoliske effekten. Sedimentfyllet inni dette hydrotermale ventkomplekset består av kremgul sandstein som likner Clarens formasjonen, og det utgjør en stor kontrast til sidebergarten som består av horisontalt stratifiserte sandsteiner fra Elliot formasjonen. Sidebergarten er tilsynelatende upåvirket av prosessene som har pågått i Witkop I. Dessverre er grensen mellom sidebergarten og det hydrotermale ventkomplekset Witkop I tildekket av løse blokker og gress. Figur 4.3 er et oversiktsbilde over Witkop I.



Figur 4.3: En oversikt over den NØ siden av Witkop I. Den kremgule sandsteinen som fyller det hydrotermale ventkomplekset kutter tydelig horisontalt lagdelt strata. Grensen mellom ventkomplekset og sidebergarten er tildekket av løse blokker og jord.

4.1 Prøvetaking

Totalt 47 prøver ble innhentet i løpet av feltarbeidet på Witkop I i løpet av mars 2001. 26 av disse ble innhentet fra tre litologiske logger som ble laget i området rundt komplekset (figur 4.5). Logg 1 ble logget ca. 300-380 m fra komplekset, og seks prøver ble hentet herfra. Logg 2 er den lengste loggen, og 12 prøver ble innsamlet herfra. Logg 2 befinner seg ca. 120-300 m fra ventkomplekset. Den tredje loggen ble utført ca. 22-55 m fra komplekset og utgjør den ytterste siden av sidebergarten. Ni prøver ble innhentet fra denne loggen. I tillegg ble det tatt enda seks prøver fra sidebergarten. 15 prøver ble tatt fra selve ventkomplekset. Alle prøvene som ble innsamlet i løpet av mars måned 2001, har fått et prøvenavn som begynner på "KO1S-" + prøvenummeret. Prøvene varierer i størrelse fra 5-20 cm i bredde. De største

prøvene ble innhentet med tanke på å kjøre seismiske hastighetsanalyser på dem. De fleste prøvene ble innhentet med formål om å kjøre petrografiske analyser ved hjelp av optisk mikroskop, sveipe elektronmikroskop, katode luminesens og XRD. De prøvene som inneholdt karbonat ble analysert for karbon og oksygen isotopverdier i et forsøk på å utrede opprinnelsen på fluidet som felte ut karbonatet samt utfellingstemperaturen for kalsitten.

I tillegg til feltturen i mars 2001, har også Henrik Svensen samlet inn seks nye prøver i juni 2003. Fire av disse prøvene er tatt fra det hydrotermale ventkomplekset Witkop I. De andre to prøvene er derimot innhentet fra to andre hydrotermale ventkomplekser som ligger i nærområdet til Witkop I, kalt Modena I og Modena II. Disse hydrotermale ventkompleksene likner på Witkop I ettersom de inneholder sandstein fra Clarens formasjonen i ventfyllet. En prøve ble hentet fra hver av de to kompleksene med formål på å sammenlikne petrografien med Witkop I-prøver. Prøvene som ble innhentet i løpet av denne feltturen er kalt "KO3HS" + prøvenummer. Figur 4.4 er et geologisk kart av feltområdet rundt Witkop I, som også viser Modena I og II.

Alle prøvelokalitetene fra Witkop I, Modena I og Modena II er plottet på et geologisk kart i figur 4.4. Det geologiske kartet i figur 4.4 kan sammenliknes med flyfotoet i figur 4.2 for å skape et godt inntrykk over feltområdet. Tabell 4.1 inneholder koordinatene og en kort beskrivelse over prøvene fra Witkop I og prøvene fra Modena I- og Modena II- området innhentet av H. Svensen. Tabell 4.2 viser en kort beskrivelse samt koordinatene for prøvene fra Witkop I –området innsamlet i 2001. Figur 4.5 er en oversikt over de litologiske loggene og som detaljert illustrerer hvor prøvene ble hentet fra. De litologiske enhetene i loggene er horisontalt lagdelt. Loggene ble ikke laget med formål om å beskrive sedimentologien i detalj, men for å holde kontrollen over de stratigrafiske posisjonene til prøvene. Det var også nødvendig å måle dybden av ventfyllet i Witkop I, for å finne nivået i ventkomplekset som er eksponert.

4.2 Resultater

Logg 1 består av seks sedimentære enheter fra overgangssonen mellom Elliot formasjonen og Clarens formasjonen, og er 28,5 m lang. Prøvene KO1S-1-6 er innhentet langs denne loggen. Fra bunnen av består loggen av en 13 m tykk sekvens av forvitret rødfarget slambergart med en diffus overgang til neste lag. Neste lag er en 4,5 m tykk enhet av homogen kremgul sandstein med avlange klaster med karbonat. KO1S-1 er tatt herfra. Grensen til neste enhet er

gradvis, og denne enheten består av 3 m med kremgul sandstein som også har avlange karbonatklaster. En kalsittåre på 6-7 cm tykkelse er plassert én m under den øvre grensen på denne enheten (figur 4.15 B). KO1S-2 er en prøve av kalsittåren, og KO1S-3 er tatt fra den øvre delen av laget. KO1S-4 er tatt fra det neste laget som er 4 m tykk og består av homogen kremgul sandstein med mørkebrune flekker. KO1S-5 er tatt fra det neste laget som også er en kremgul sandsteinsenhet, på tre m tykkelse. Bergarten har områder som er mørkebrune og hvitgule i tillegg til hvite korn i matriksen. Den øverste enheten i denne loggen er også kremgul sandstein som også har soner med mørkebrune og fiolette flekker. KO1S-6 er tatt fra denne enheten.

Logg 2 er 81 m lang og består av sedimentære enheter fra Elliot formasjonen og enheter fra overgangssonen mellom Elliot- og Clarens formasjonene. Sekvensen veksler mellom kremgul sandstein og rød slambergart gjennom hele den litologiske loggen. Prøvene KO1S-7-17 er innhentet langs denne loggen.

Fra bunnen av består loggen av 22 m med rødfarget lagdelt og kryssjiktet slambergart. KO1S-7 er en prøve fra denne enheten. Neste enhet er en 3 m tykk lys kremgul sandstein som er lagdelt. Den består av gule forvitringssoner på 0,4 cm i diameter som er omgitt av en svart kant. KO1S-8 er hentet fra denne enheten. Den tredje enheten er en fire m tykk homogen kremgul sandstein med leirklaster, der den nederste meteren er kalsittsementert. KO1S-10 er tatt fra denne nederste meteren av enheten. KO1S-9 er tatt fra den øverste delen av denne enheten. De neste fire meterne i stratigrafien er overdekket av løse blokker og gress. Det neste laget er nok en seks meter tykk kremgul sandsteinsenhet som inneholder soner med forvitrede hulrom og andre partier med svarte og lysebrune flekker. KO1S-11 er tatt fra bunnen av dette laget. KO1S-12 er tatt fra den to m tykke kremgule sandsteinsenheten over. Også denne sandsteinen har partier med gråe og svarte flekker, men her er de samlet i større soner enn i det underliggende laget. Overflaten på dette laget er meget forvitret. De neste fire meterne i stratigrafien er overdekket av løse blokker og gress, men det er observert en 1,5 m høy benk i den øverste delen som ender helningen i terrenget. Den neste enheten er en 13 m tykk rød og fiolett farget siltsteinsenhet. Den har soner med gråe, hvite og fiolette flekker i tillegg til utvitrede hulrom. KO1S-17 er tatt fra den nederste delen av denne enheten. Neste enhet er 2,5 m tykk og består av homogen kremgul sandstein. Den har soner med svarte, gule og lysebrune partier. KO1S-13 er innhentet fra den nederste delen av det neste laget som består av seks meter tykk oppovergrovende rød siltstein. På toppen av enheten inneholder den klaster av

leire og fossiler med karbonat. KO1S-14 er tatt fra denne enheten. Den neste enheten er nok et kremgult sandsteinslag, og i dette laget er det funnet kryssjikt i tillegg til at det har soner med lysebrune partier. Neste enhet er 7 m tykk og består av hvitgul sandstein med soner av brune partier. Den sterke forvitringen har dannet hulrom mot toppen av denne enheten. KO1S-16 er tatt fra dette laget.

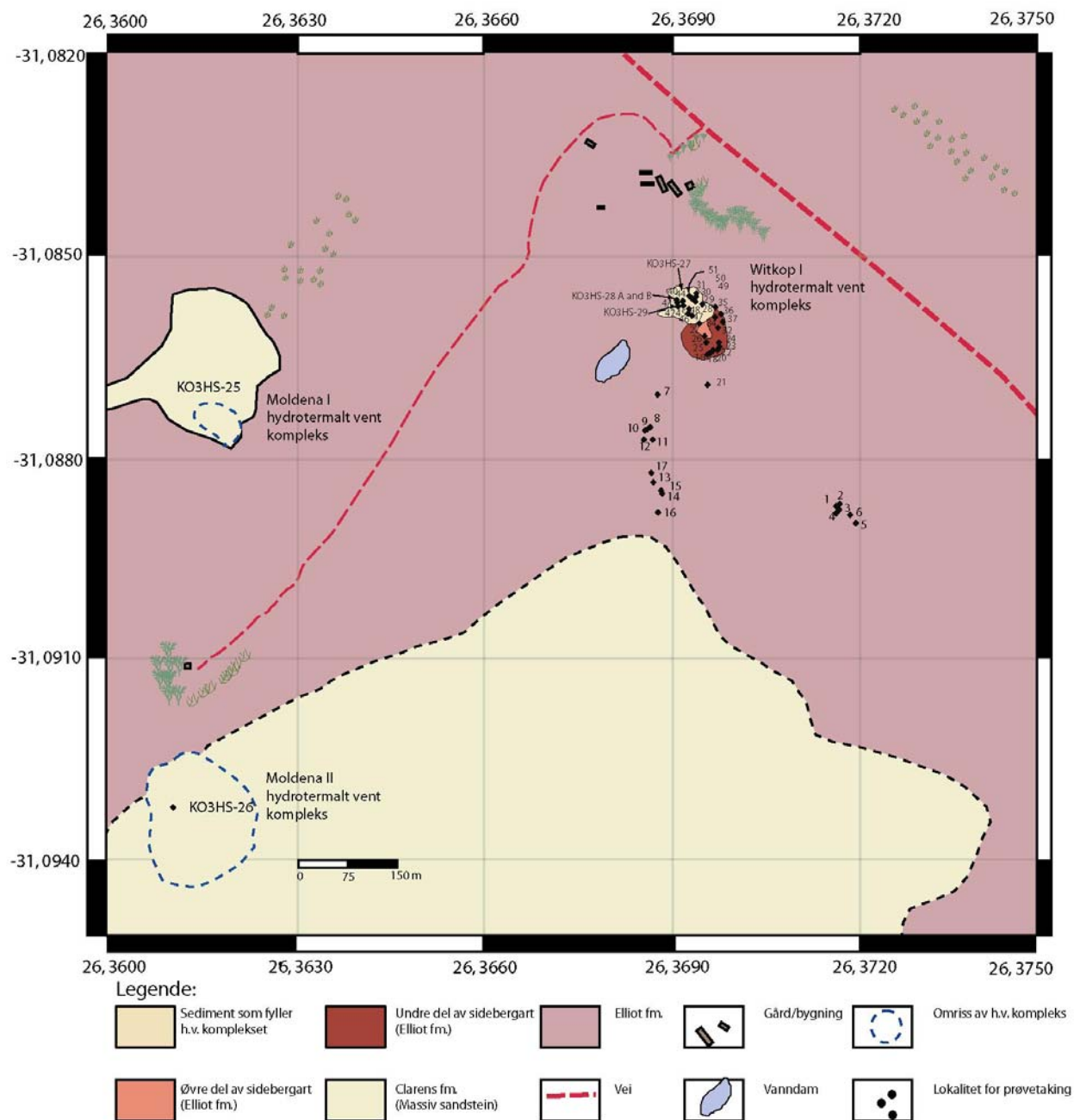
Logg 3 er 46 m lang og består av sedimentære enheter fra Elliot formasjonen ved bunnen og fra overgangssonen mellom Elliot- og Clarens formasjonen. Prøvene KO1S-18-26 er samlet langs denne loggen. Logg 3 er plassert i sidebergarten til det hydrotermale ventkomplekset.

Fra bunnen av består logg 3 av en 23 m tykk rødfarget slambergart. De nederste 19 m er dekket til av gress. De øverste 4 m som er blottlagt inneholder karbonatnoder rundt 4 cm i diameter med ujevn form. Oppover ender disse nodulene gradvis form og blir mer forlenget i horisontal retning, og til slutt danner de lag. Ved den øvre grensen til det neste laget forekommer det flere åreutløp som inneholder kalsitt. KO1S-18 A og B er prøver fra disse åreutløpene. KO1S-19 og KO1S-20 er tatt fra den øverste delen av den første enheten i logg 3 som er en overgangssone, se figur 4.15 A. KO1S-21 er innhentet fra den nederste m av laget som er blottlagt. Den andre enheten i logg 3 er en kremgul sandstein som KO1S-23 er samlet fra. Denne bergarten inneholder soner med gråe og brune partier og utvitrede hulrom med karbonatinnhold. De neste 3 m i stratigrafien er tildekket av løse blokker og gress. KO1S-24 er tatt fra det neste laget i stratigrafien. Dette er også en kremgul sandstein med spredte partier av mørkebrune og svarte områder. Tykkelsen på denne enheten er noe uklar ettersom den øvre grensen gradvis. Dog, de virker som om den minst er 3 m tykk. Over den overdekte stratigrafien finnes det en annen kremgul sandsteinsenheter på 1,5 m tykkelse. Denne enheten har soner med leirklaster og KO1S-25 A og B er prøver tatt herfra. De neste to m i stratigrafien er tildekket med gress. Den øverste enheten i logg 3 er også en kremgul sandsteinsenheter med partier av lysebrunt materiale. KO1S-26 er tatt fra denne enheten, som har en grov forvitret overflate. På denne overflaten er det også observert et forvitningsfenomen som har medført dannelse av utvitrede huler (”pitholes”).

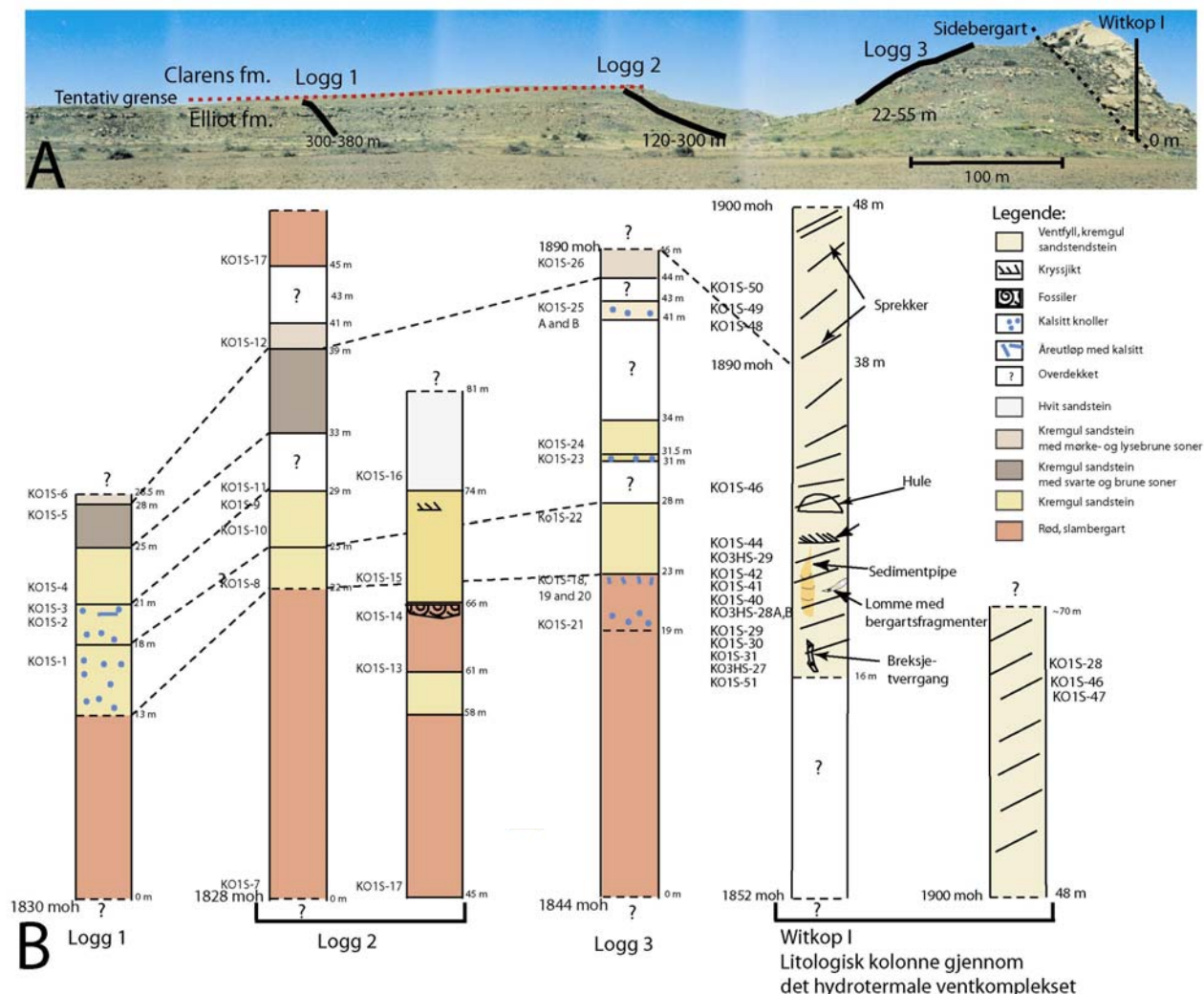
I tillegg til prøvene som ble innsamlet langs logg 3, er også fem andre prøver fra sidebergarten innsamlet: KO1S-27, KO1S-34-37 (figur 4.6 og 4.7). KO1S-27 er tatt fra en sedimentær enhet som er plassert rett over det siste laget i logg 3 og bare 2 m fra selve ventkomplekset Witkop I. Det er en kremgul sandstein som er sterkt forvitret på overflaten.

KO1S-34 er også en kremgul sandsteinsprøve tatt fra en enhet som ligger over laget KO1S-32 og KO1S-35 er innehentet fra. KO1S-32 og KO1S-35 er finkornet kremgul sandstein tatt fra en enhet som er plassert over det laget som KO1S-36 og KO1S-37 ble hentet fra. KO1S-36 og KO1S-37 er rødfarget slambergart.

15 prøver ble samlet inn fra Witkop I fra selve hydrotermale ventkomplekset (se figur 4.6, 4.7 og 4.8). De er alle finkornede kremgule sandsteiner som har vært utsatt for sterk forvitring. Noen av disse prøvene inneholder leirklaster (KO1S-31, -40, -42, -44, -45, -47 og -51). Resten av prøvene fra Witkop I inneholder ikke fragmenter eller klaster, og disse er: KO1S-28, -29, -30, -46, -48, og -49. KO1S-40 er tatt fra en karbonatsementert sedimentær pipestruktur, se figur 4.10. KO1S-41 er tatt fra en liknende struktur ved siden av KO1S-40. KO1S-42 er tatt fra en linse som inneholder bergartsfragmenter som er mye grovere enn matriksen (figur 4.12). Disse tre prøvene (KO1S-40, -41, -42) skiller seg ut fra resten av sedimentet i Witkop I. Matriksen i disse tre prøvene er mer finkornet, hvitere og gråere sammenliknet med matriksen fra omgivende bergart. Disse tre prøvene inneholder også kalsittsement i kontrast til resten av ventfyllet i Witkop I. I tillegg inneholder de flere kantformede klaster og fragmenter.



Figur 4.4: Et geologisk kart over feltområdet rundt Witkop I som viser prøvelokalitetene. Kartet ble laget ved hjelp av å plote koordinatene fra GPS i et GPS Trackmaker program og siden importere det i Adobe Illustrator. GPS koordinatene av Witkop I og sidebergarten var registrert av H. Svensen, og prøvekoordinatene ble samlet inn av S. A. L. Sali etter hvert som de ble innehentet. Andre ting på kartet som trær, busker, vanddam, vei og gårder er tegnet inn på grunnlag av flyfotoet i figur 4.2. Grensen mellom Elliot- og Clarens formasjonen er gradvis, og den grensen som er dratt på dette geologiske kartet er tentativ og representerer forekomst av massiv og homogen kremgul sandstein fra Clarens formasjonen. Denne grensen er dratt på basis av både feltobservasjoner og fra flyfotoet i figur 4.2. Noen av prøvene er plottet kun ved et nummer pga. plassmangel. KO3HS -prøvene er plottet inn manuelt, ettersom disse koordinatene dessverre, på et uforklarlig vis, plottet langt fra deres reelle lokalitet.



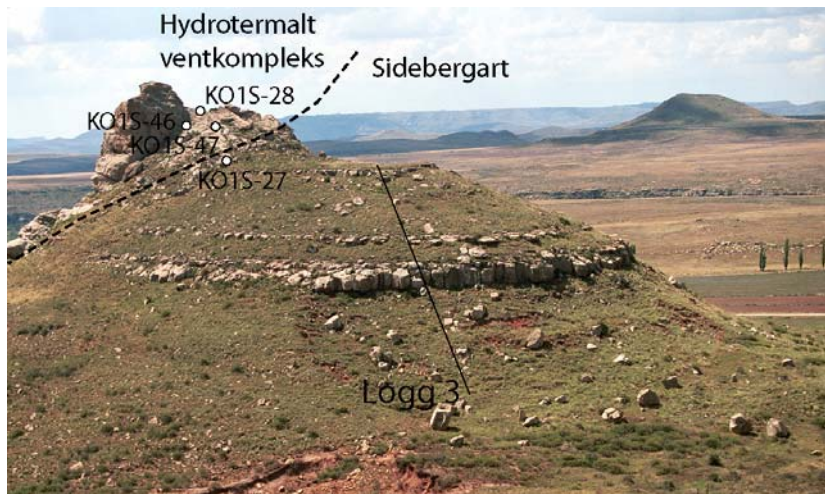
Figur 4.5: De tre litologiske loggene som ble målt på forskjellige avstander fra Witkop I. **A:** Et foto som viser NØ side av det hydrotermale ventkomplekset som viser posisjonene til loggene. **B:** De tre litologiske loggene beskrevet i detalj. Logg 1 er målt ca. 300-380 m fra vent komplekset. Logg 2 er målt ca. 120-300 m fra Witkop I, mens logg 3 er plassert i sidebergarten til ventkomplekset ca. 22-55 m fra Witkop I. Den litologiske kolonnen til høyre i figuren er et snitt gjennom Witkop I, selve hydrotermale ventkomplekset, den er laget på basis av feltobservasjoner og prøvetaking. Høyden er målt på basis av sammenlikning av bredden på Witkop I i figur 4.2 og på høyden i figur 4.3.

Tabell 4.1. Prøver fra Witkop I, Modena I og II					
Prøve	Bergart	Lokalitet	Formasjon	S	Ø
KO3HS-25	Krengul sandstein	Modena I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.520	026 36.061
KO3HS-26	Grå sandstein	Modena II	Hydrotermalt vent k.	-31 09.118	026 36.097
KO3HS-27	Breksje som kutter sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.331	026 36. 553
KO3HS-28A	Grå sandstein fra kalsitt sementert sedimenær	Witkop I	Pipe-struktur i h. vent .k.	-31 08.341	026 36. 548
KO3HS-28B	Krengul sandstein utenfor KO3HS-28A	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.341	026 36.548
KO3HS-29	Grå løse fragmenter (samme som KO1S-42)	Witkop I	Linse i hydr.vent. k.	-31 08.346	026 36.544

Prøve	Bergart	Lokalitet	Formasjon	S	Ø
KO1S-1	Kremgul sandstein	Logg 1	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.876	026 37.167
KO1S-2	Kalsittåreutløp	Logg 1	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.875	026 37.166
KO1S-3	Kremgul sandstein	Logg 1	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.874	026 37.162
KO1S-4	Kremgul sandstein	Logg 1	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.881	026 37.159
KO1S-5	Kremgul sandstein	Logg 1	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.898	026 37.189
KO1S-6	Kremgul sandstein	Logg 1	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.887	026 37.181
KO1S-7	Rød siltstein	Logg 2	Elliot formasjonen	-31 08.708	026 36.876
KO1S-8	Kremgul sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.758	026 36.862
KO1S-9	Kremgul sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.760	026 36.857
KO1S-10	Kalsittsementert kremgul sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.759	026 36.856
KO1S-11	Kremgul sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.773	026 36.866
KO1S-12	Kremgul sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.776	026 36.855
KO1S-13	Rød siltstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.835	026 36.868
KO1S-14	Rød siltstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.856	026 36.881
KO1S-15	Kremgul sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.853	026 36.880
KO1S-16	Hvitgul sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.882	026 36.875
KO1S-17	Rød og fiolett sandstein	Logg 2	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.823	026 36.864
KO1S-18 A,B	Kalsittåreutløp	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.646	026 36.966
KO1S-19	Grårød siltstein	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.646	026 36.966
KO1S-20	Rød siltstein	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.646	026 36.966
KO1S-21	Rød siltstein	Logg 3	Elliot formasjonen	-31 08.694	026 36.953
KO1S-22	Kremgul sandstein	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.643	026 36.974
KO1S-23	Kremgul sandstein	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.647	026 36.962
KO1S-24	Kremgul sandstein	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.367	026 36.976
KO1S-25 A,B	Kremgul sandstein	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.630	026 36.955
KO1S-26	Kremgul sandstein	Logg 3	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.623	026 36.950
KO1S-27	Kremgul sandstein	Sidestein	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.602	026 36.939
KO1S-28	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.586	026 36.925
KO1S-29 A,B	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.574	026 36.939
KO1S-30	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.570	026 36.941
KO1S-31	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.569	026 36.945
KO1S-32 A,B	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.611	026 36.974
KO1S-34	Kremgul sandstein	Sidestein	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.587	026 36.959
KO1S-35	Kremgul sandstein	Sidestein	Overgangen Elliot/Clarens	-31 08.579	026 36.957
KO1S-36	Rød siltstein	Sidestein	Elliot formasjonen	-31 08.594	026 36.977
KO1S-37	Rød siltstein	Sidestein	Elliot formasjonen	-31 08.605	026 36.984
KO1S-40	Hvitgrå sandstein med fragmenter	Witkop I	Pipe i hydr. vent k.	-31 08.572	026 36.919
KO1S-41	Hvitgrå sandstein med fragmenter	Witkop I	Pipe i hydr. vent k.	-31 08.575	026 36.916
KO1S-42	Grå sandstein med fragmenter	Witkop I	Linse i hydr.vent k.	-31 08.574	026 36.905
KO1S-44	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.578	026 36.926
KO1S-45	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.584	026 36.931
KO1S-46	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.585	026 36.931
KO1S-47	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.590	026 36.936
KO1S-48	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.576	026 36.931
KO1S-49	Forvitringsoverflate, sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.578	026 36.932
KO1S-50	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.576	026 36.930
KO1S-51	Kremgul sandstein	Witkop I	Hydrotermalt vent k.	-31 08.570	026.36.946



Figur 4.6: NØ side av Witkop I som viser lokalitetene hvor noen av prøvene ble innsamlet fra.



Figur 4.7: SØ side av Witkop I, som viser lokalitetene hvor noen prøver ble hentet fra. Den viser også hvor logg 3 ble målt og at den ligger i sidebergarten som grenser til det hydrotermale ventkomplekset.



Figur 4.8: VØ side av Witkop I som viser lokalitetene for prøveinnhenting fra selve ventkomplekset samt beliggenheten av en kalsittementert sedimentær pipestruktur, og andre strukturer som skråsjikt og sprekker. En person angir størrelsesskalaen.

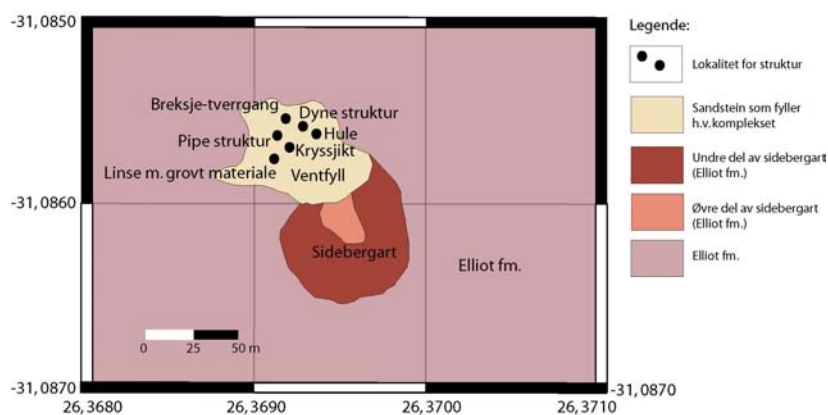
4.3 Witkop I – et hydrotermalt ventkompleks

”Witkop” er nederlandsk og betyr ”hvit hode”, noe som er en god beskrivelse for synet man møter på denne lokaliteten. Det første man legger merke til er en kremgul sandstein som står ut som en positiv erosjonsstruktur som kutter horisontalt lagdelt strata. Den horisontale stratigrafien representerer den øverste delen av Elliot formasjonen. Elliot formasjonen er dominert av rødfarget fluviale slambergarter og paleo-jordprofil. Den øverste delen består av vekslende lag av rødfargede silt- og leirstein med fin- til medium kornet kremgul sandstein som er avsatt eolisk. Den eoliske effekten øker oppover i stratigrafien som kan sees ved at de kremgule sandsteinslagene blir hyppigere på toppen av Elliot formasjonen. Figur 4.3 er et oversiktsbilde over Witkop I.

Witkop I er et hydrotermalt ventkompleks på ca. 70 m høyde og 60 m bredde, og det hele består av finkornet kremgul og massiv sandstein. Det er ikke observert andre anomalier av sedimentære lag som for eksempel lag av rødfargede silt- og leirsteiner. En slik tykkelse (ca. 70 m) på kremgul massiv sandstein er ikke nådd i noen av de litologiske loggene som ble laget i dette området under feltsesongen 2001. Men da H. Svensen var ute i felten i juni 2003 besøkte han også to andre hydrotermale ventkomplekser som ligger i nærheten av Witkop I. Disse hydrotermale ventkompleksene er plassert inni homogen kremgul sandstein fra Clarens formasjonen litt lenger oppe i stratigrafien. Hans observasjoner kombinert med flyfoto og lengden på loggene utgjør basisen for å trekke en tentativ grense mellom mellom Elliot formasjonen og Clarens formasjonen. Grensen er gradvis med vekslende lag av kremgul sandstein og rød siltig slambergart, men denne tentative grensen representerer starten på den homogene kremgule sandsteinen fra Clarens formasjonen. Basert på dette kan man med sikkerhet si at den kremgule sandsteinen inni Witkop I enten må ha blitt forflyttet nedover minst 58 m (og mest sannsynlig mer), eller så har det pågått en in situ sedimentering av Clarens formasjonen i en nedsunken topografi som lå minst 58 m (og mest sannsynlig mer) under normalen.

4.4 Småskala strukturer i Witkop I

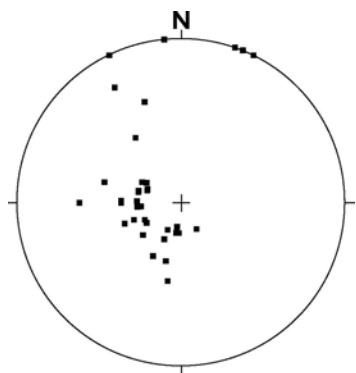
Figur 4.9 er et oversiktskart over lokalitetene til de strukturene som er observert på Witkop I. Den kremgule finkornete sandsteinen inni Witkop I er for det meste homogen, dog er noen heterogeniteter og strukturer observert. Først og fremst er det mange sprekker som kutter gjennom hele ventkomplekset, og disse sprekkeene ser ut til å følge sedimentære strukturer i ventfyllet. Strøk og fall målinger fra sprekkeene er presentert i tabell 4.3 og plottet i stereonett i



Figur 4.9: Et oversiktskart over Witkop I, som viser lokalitetene til de ulike strukturene som er observert. Kartet er laget ved hjelp av å plote GPS-koordinatene i et GPS Trackmaker program, og siden importere dette i Adobe Illustrator.

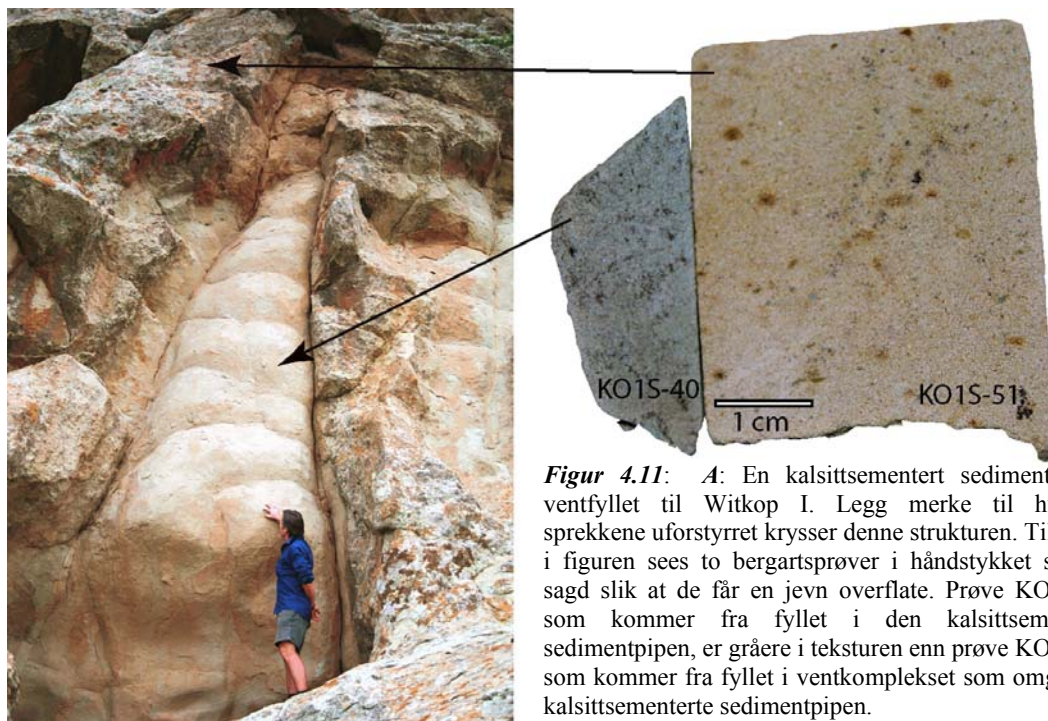
figur 4.10, og ut ifra dette kan man si at sprekkene langt ifra er parallelle. Sprekkene har ulike strøk og fall-verdier. Figur 4.14 B og C viser at sprekker følger sedimentære strukturer som kryssjikt og dyne, noe som betyr at avsetningen av disse sedimentene ikke har foregått horisontalt, dersom sprekkene representerer lagflater. Hvis sprekkene skulle være et resultat av bare avlastning (eksfoliasjonssprekker) ville de sannsynligvis ha vært mer parallelle.

En annen anomali, som er svært iøyefallende, er en vertikal kjegleformet struktur på ca. 6,5 m høyde, der den smaleste delen er på toppen (figur 4.11). Den sedimentære bergarten inni denne strukturen skiller seg fra resten av materialet i Witkop I, ved at den inneholder kalsitt, er mer finkornet og hvitere i matriksen, og den inneholder mange ujevne gråe og svarte fragmenter og klaster (KO1S-40 og KO3HS-28 A er prøver innhentet fra denne strukturen som også kalles en kalsittsementert sedimentpipe-liknende struktur).



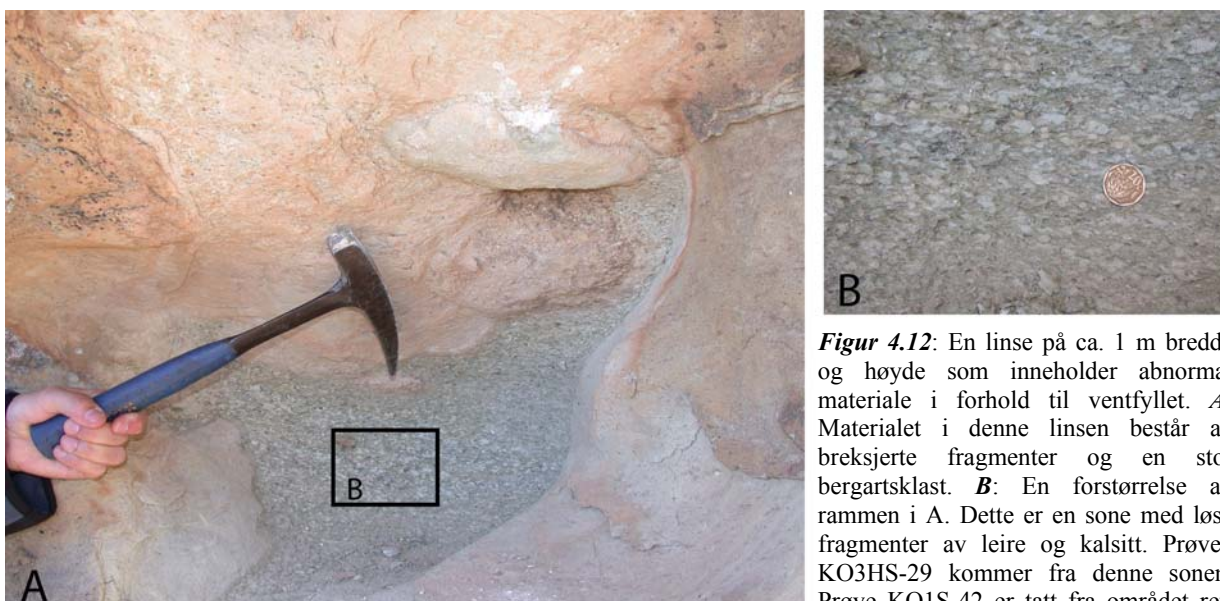
Figur 4.10: Et stereonett som viser polene til sprekkeplanene i Witkop I. Programmet Stereonet er brukt for denne plottingen.

Tabell 4.3. Strøk/fall for sprekkene i Witkop I:			
297/15	340/25	016/22	055/40
240/15	002/22	020/18	015/40
280/12	340/30	022/18	244/90
275/15	340/30	014/22	264/90
070/55	002/30	030/20	320/25
060/70	355/20	292/90	028/22
280/40	355/22	289/90	015/40
000/52	330/20	296/90	360/30



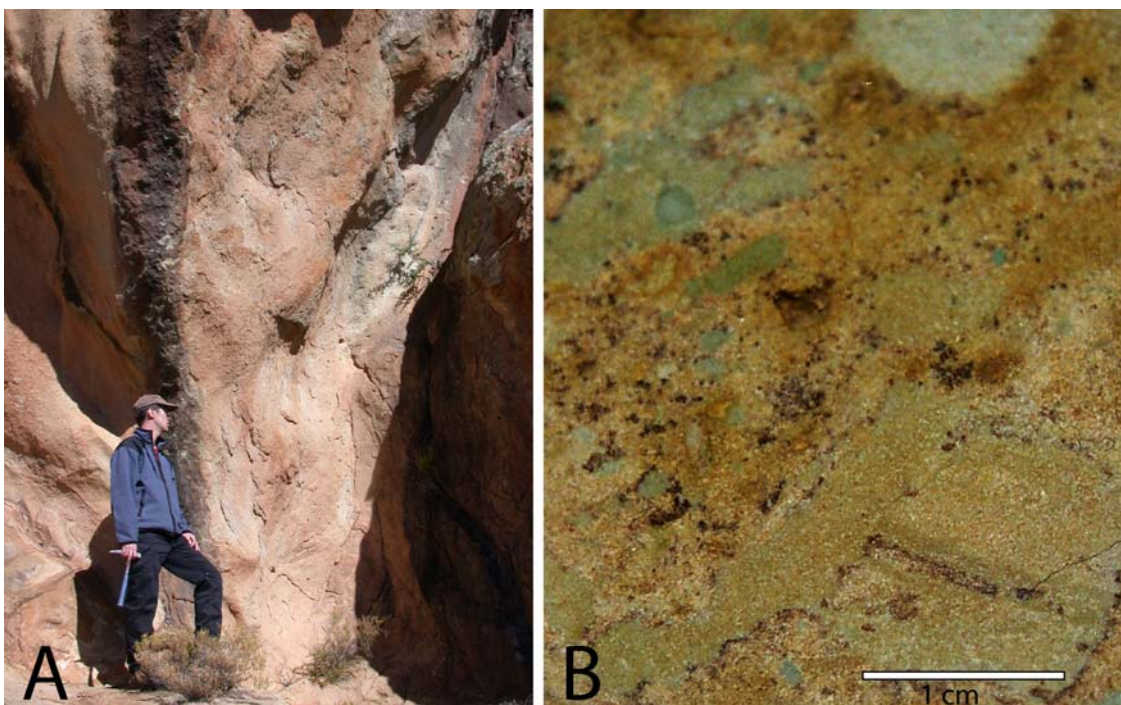
Figur 4.11: *A:* En kalsittsementert sedimentpipe i ventfyllet til Witkop I. Legg merke til hvordan sprekke uforstyrret krysser denne strukturen. Til høyre i figuren sees to bergartsprøver i håndstykket som er sagt slik at de får en jevn overflate. Prøve KO1S-40, som kommer fra fyllet i den kalsittsementerte sedimentpipen, er gråere i teksturen enn prøve KO1S-51, som kommer fra fyllet i ventkomplekset som omgir den kalsittsementerte sedimentpipen.

En annen anomali i Witkop I er en linse med breksje som er ca. 1 m lang og bred og består av en helt annen type materiale enn resten av det hydrotermale ventkomplekset (figur 4.12). Matriksen er finere kornet, hvitere og gråere en omgivende bergart (KO1S-42 er en prøve fra denne linsen). I tillegg inneholder denne linsen grovere bergartsfragmenter (en av disse er over 20 cm lang). Et mindre område innenfor denne linsen består av ikke-kohesive fragmenter av leire og bergart (KO3HS-29 er en prøve fra dette materialet).



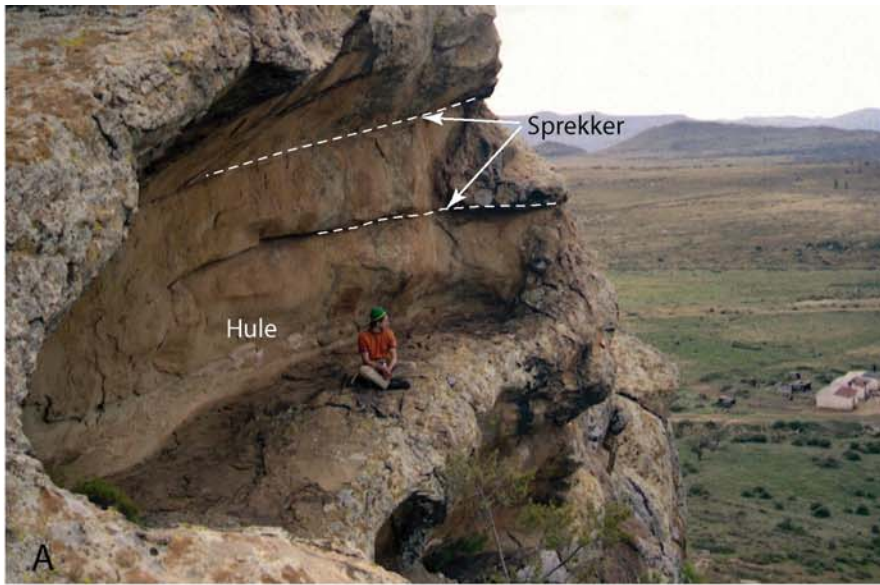
Figur 4.12: En linse på ca. 1 m bredde og høyde som inneholder abnormal materiale i forhold til ventfyllet. *A:* Materialet i denne linsen består av breksjerte fragmenter og en stor bergartsklast. *B:* En forstørrelse av rammen i A. Dette er en sone med løse fragmenter av leire og kalsitt. Prøven KO3HS-29 kommer fra denne sonen. Prøve KO1S-42 er tatt fra området rett over denne sonen. Foto: Svensen (2003).

Svensen observerte i juni 2003, en tverrgang bestående av breksje med fragmenter av sedimentær bergart som kutter i den kremgule sandsteinen som fyller Witkop I. Denne breksje-tverrgangen har en finkornet kremgul og lysebrun matriks med sedimentære fragmenter av varierende størrelser, fra 0,2 cm store til 2,0 cm store fragmenter (prøve KO3HS-27, figur 4.13). Fragmentene er meget kantete og dårlig sortert, de er mørkebrune, svarte, lysegrå eller hvite i farge.



Figur 4.13: En tverrgang bestående av breksjert materiale som kutter den kremgule sandsteinen som fyller ventkomplekset. **A:** Et bilde av tverrgangen i felt (Foto: Svensen 2003). **B:** Et bilde av prøve KO3HS-27 i håndstykket med jevn overflate, som er tatt fra tverrgangen i A. Denne prøven inneholder kantete fragmenter som består av kremgrå sandstein og frå leirstein, mens matriksen består av kremgul sandstein. Slike fragmenter er kun observert i denne tverrgangen.

Andre strukturer som huler på 4 m høyde og 10 m lengde, kryssjikt og dynestrukturer er også observert. Disse strukturene kan være sedimentære strukturer som stammer fra den originale Clarens formasjonen. Figur 4.14 viser noen bilder over disse anomaliene.

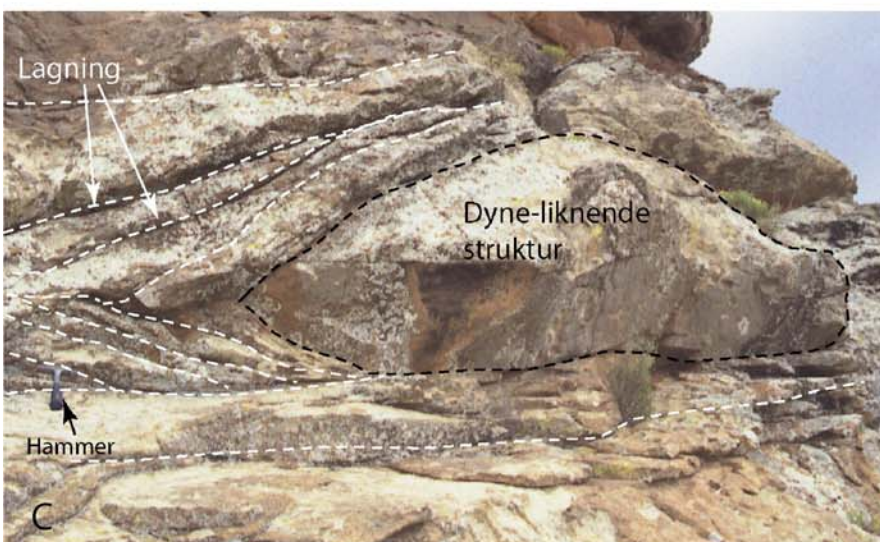


Figur 4.14: Sedimentære strukturer inni ventfyllet til Witkop I.

A: En hule som inneholder sprekker. (Henrik Svensen)



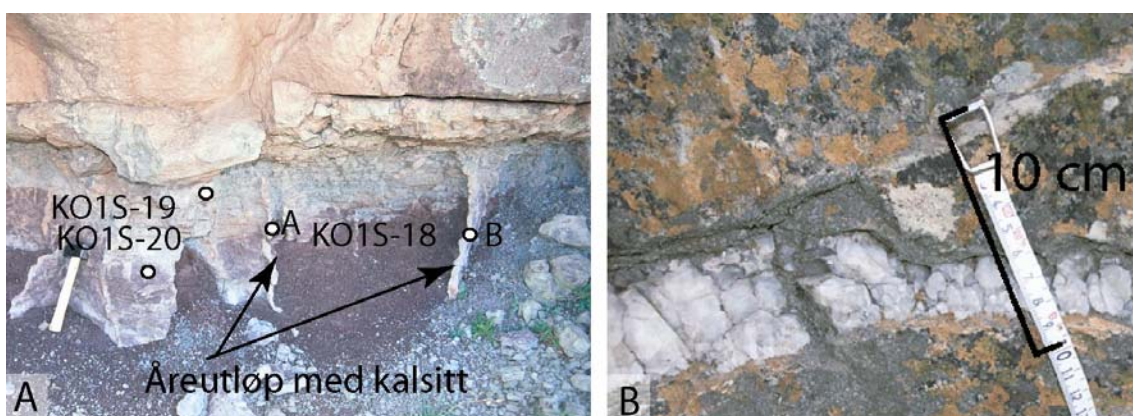
B: En kryssjikt-liknende struktur. Oppsprekningen følger lagflatene i kryssjiktet.



C: En dyneliknende struktur. Oppsprekningen følger morfologien til strukturen.

4.5 Observasjoner utenfor Witkop I

Det er ikke observert tydelige tegn på at det hydrotermale ventkomplekset har påvirket sidebergartene hydrotermalt. Ettersom sidebergarten fremdeles ligger horisontalt ser det også ut til at den mekaniske påkjenningen på sidebergarten har vært liten. Derimot er det funnet noen kalsittårer og åreutløp som inneholder kalsitt, i logg 1 og i logg 3. Kalsittåren i logg 1 er ca. 1 m lang og 6-7 cm bred, og den er plassert i en kremgul sandsteinsenhet (KO1S-2 er en prøve fra dette åreutløpet, figur 4.15 B). Kalsittåreutløp fra logg 1, er mindre i størrelse, fra 20-50 cm lang til ca. 2 cm brede (KO1S-18 A og B er prøver fra disse åreutløpene, figur 4.15 A). Disse åreutløpene er plassert i overgangssonen av rødfarget til gråfarget leirstein i de øverste 50 cm i den underste enheten i logg 3, som ser ut som et jordprofil.



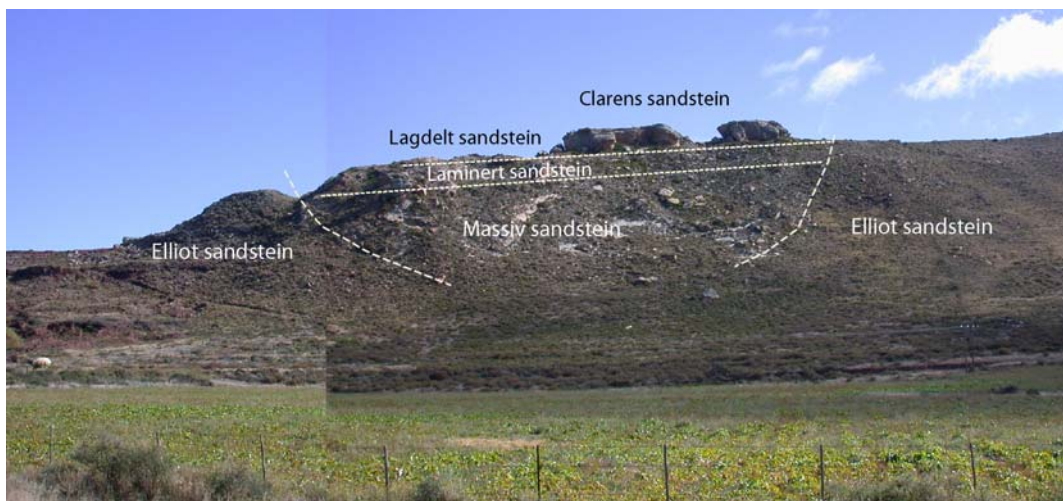
Figur 4.15: Åreutløp med kalsitt. **A:** Ved grensen mellom den underste enheten i logg 3 og det overliggende laget er det observert flere åreutløp som inneholder kalsitt. KO1S-18 A og B er innhentet fra disse åreutløpene. **B:** Fra logg 1 er det observert en kalsittåre i den nest underste enheten. KO1S-2 er en prøve herfra.

4.6 Modena I og Modena II hydrotermale vent komplekser

I juni 2003 besøkte Svensen de hydrotermale ventkompleksene Modena I og Modena II, som ligger i nærheten av Witkop I (se figur 4.2 og 4.4). Begge disse kompleksene er plassert i overgangssonen mellom Elliot- og Clarens formasjonen, akkurat slik som Witkop I, som består av vekslende sedimentære lag av kremgul sandstein og rødfarget slambergart. Dog, Modena I og II er blottet litt høyere oppe i stratigrafien der den homogene kremgule sandsteinen fra Clarens formasjonen fremtrer. Det sedimentære materialet som fyller Modena I og Modena II er kremgul sandstein. En prøve er innsamlet fra hver av disse to kompleksene, KO3HS-25 fra Modena I og KO3HS-26 fra Modena II.

Den eksponerte delen av Modena I og II, er av Svensen inndelt i tre soner som har ulike karakteristikk (figur 4.16). Den nederste sonen er karakterisert av massiv kremgul sandstein,

mens den midterste sonen er dominert av laminert kremgul sandstein. Den øverste sonen består av lagdelt kremgul sandstein.



Figur 4.16: Ø-siden av Modena I hydrotermale ventkompleks (Photo: Svensen, 2003).

4.7 Sammendrag

Witkop I består av:

- En indre sone med kremgul sandstein som har en høyde på ~70 m. En så stor og homogen kremgul sandsteinsenheter er ikke nådd i noen av de tre loggene som er laget i området. Ut fra loggene ser man da at den kremgule sandsteinen som fyller Witkop I ligger på et nivå som minimum er 58 m lavere enn hva man kan forvente ved normal avsetning.
- En "ytre sone" som omgir ventkomplekset, som tilsynelatende er mekanisk upåvirket av det hydrotermale ventkomplekset. De litologiske enhetene i denne sonen er horisontalt lagdelte. Derimot står den, i likhet med den indre sonen, ut i terrenget som en positiv erosjonsstruktur.
- En nedre del av massiv kremgul sandstein med en mektighet på ca. 30 m. Denne delen inneholder sedimentære strukturer. Den øvre delen av ventfyllet i Witkop I (ca. 40 m) består også av massiv kremgul sandstein der det ikke er observert sedimentære strukturer, bortsett fra sprekker.
- Hele ventfyllet i Witkop I er karakterisert av sprekker, og ettersom disse følger formen til observerte sedimentstrukturer, antas det at sprekkenes er dannet langs lagflater i sedimentet, muligens pga. avlastning forårsaket av erosjon.

- Tverrgang med breksjert materiale. Den kremgule sandsteinen som fyller ventkomplekset er kuttet av en tverrgang som inneholder kantete og runde fragmenter av sedimentær bergart. Matriksen består også av sandstein.
- Kalsittsementert sedimentpipe-liknende struktur. Denne bergarten er gråere i matriksen er resten av ventfyllet. Sprekker er observert å kutte denne strukturen og fortsette videre gjennom sidebergarten. Derfor tolkes dette til ikke å representere en tverrgang, men heller trolig en migrasjonssone for fluider. En prøve fra denne kalsittsementerte pipestrukturen er analysert for lette stabile isotop-verdier. Resultatet av denne analysen er gitt i kapittel 7.
- De hydrotermale ventkompleksene Modena I og II har like karakteristikk og derfor antas det at de har samme dannelsesprosesser som Witkop I.

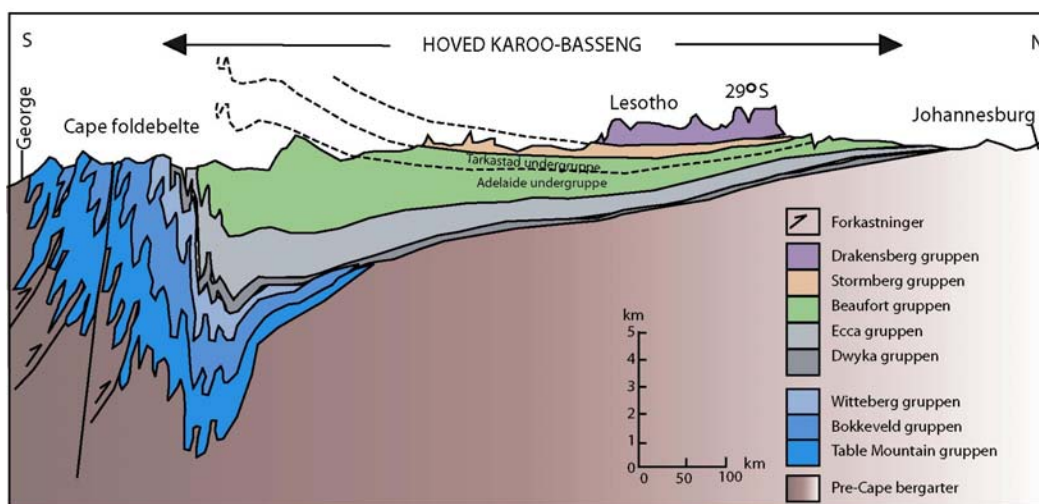
KAPITTEL 5 PETROGRAFI OG DIAGENESE

5.0 Petrografi

Dette kapitlet tar for seg petrografibeskrivelser som er utført med hensyn på å redegjøre for litologiforskjeller mellom ventsandstein fra Witkop I og omliggende sedimenter. I tillegg er ventsandstein fra Modena I og II beskrevet. Metodene som er benyttet er beskrevet i kapittel 3. Først beskrives diagenesen og petrografien ut ifra tidligere arbeid fra andre geologer som har jobbet med Karoo-bassenget. Til slutt gis det en oversikt i tabell 5.1 over de ulike petrografiske egenskapene til de forskjellige litologiene. Pga. plassmangel er det benyttet en del forkortelser, se kapittel 10.0.

5.1 Diagenese i Karoo-bassenget

Figur 5.1 er et tverrsnitt over Karoo-bassenget som viser hvorledes de ulike litologigruppene er utsatt for forskjellige begravningsdybder. Generelt er det en minking i diagenesegrad fra sørvest mot nordøst (Rowsell og de Swardt, 1976).



Figur 5.1: Et tverrsnitt av Karoo-bassenget fra sør til nord som viser hvordan de ulike litologiske enhetene er utsatt for forskjellige begravningsdybder som videre har effekt for diagenesen (modifisert etter Johnson et al., 1997). Stormberg gruppen består nederst av Molteno-, Elliot- og Clarens formasjonene.

Det er en markant endring av diagenesegrad ved lengdegraden 29°S i øst og 30° i vest. Nord for disse lengdegradene er sedimentene utsatt for normal diagenese, og den eneste metamorfosen som finner sted er forårsaket kun av magmatiske intrusiver. Her kan skifre fra Eccca gruppen, og muligens også undre Beaufort gruppen, fungere som kildebergarter for olje og våtgass. Sør for 29°S, er diagenesegraden derimot noe større. Her inneholder Dwyka

gruppen og den nederste delen av Eccla gruppen autigene mineraler som kloritt og muskovitt. Det er også funnet laumontittsement i øvre Eccla gruppen (i prøver hentet langt fra magmatiske intrusiver). Stormberg sedimentene, som jo er på et høyere stratigrafisk nivå, er naturligvis av en lavere diageneseegrad. Følgende leirmineraler er rapportert fra Rowsell og de Swardt (1976): kloritt, montmorillonitt, alleverditt og illitt.

Petrografen av Stormberg sedimentene er ikke godt beskrevet i litteraturen. Turner (1972) har beskrevet Molteno- og Elliot formasjonene. Molteno formasjonen er lys farget, fin til grovkornet kvartsittiske sandsteiner som hovedsaklig består av kvarts, feltspat, bergartsfragmenter, glimmer og leirematris. Det meste av kvartsen er undulerende og monokrystallin. I følge Turner(1972) er de klassifisert som leireholdige litiske gråvakker. Molteno sandsteinen inneholder sekundær silika i form av kvartspåvekst i optisk kontinuitet med det detriale originale kornet, og i form av sement som fyller porerommene og andre hulrom i bergarten (Turner, 1972). Elliot formasjonen er dominert av massive, røde og kvartsrike silt- og leirsteiner. Den røde fargen er på grunn av hematittsøm ("stain") som er mer utviklet i leirrike bergarter i forhold til mindre leirrike bergarter (Turner, 1972).

Petrografi av Clarens formasjonen fra Natal Drakensberg distriktet er utført av Eriksson (1981) og viser at sandsteinen er finkornet gråvakke med kantete kornform og dårlig sortering. Clarens formasjonen inneholder 50-60 % kvarts, 10 % feltspat og 30-40 % matris som vesentlig består av kloritt. Matrisen kan også inneholde kalsitt. Flere av de studerte prøvene hadde leirklaster bestående av sekundær kalsitt og kalsitt i forbindelse med klorittisk leirstein. Alle prøvene hadde kvartspåvekst. Aksessoriske mineraler inkluderer zirkon, opake jernmineraler, granat, titanitt, riebeckitt, hornblende og spinell. Gjennomsnittlig porøsitet målt av Roswell og de Swardt (1976) er 15,1 %.

De ulike petrografiske karakteristikkene tilsvarer det paleomiljøet under avsetningen (Roswell og de Swardt, 1976). Den finkornete sandsteinen er sannsynligvis løssavsetninger. Dårlig rundet og kantete kornform indikerer kort transportdistanse eller avsetning ved meget lav energisystem. Tilstedeværelse av irregulært fordelt kalsittsement tyder på kapillære bevegelser av grunnvann eller at kilden var tilfeldig fordelt innen sedimentet. Avsetningsmiljøet var dominert av våt ørken og ørken flom.

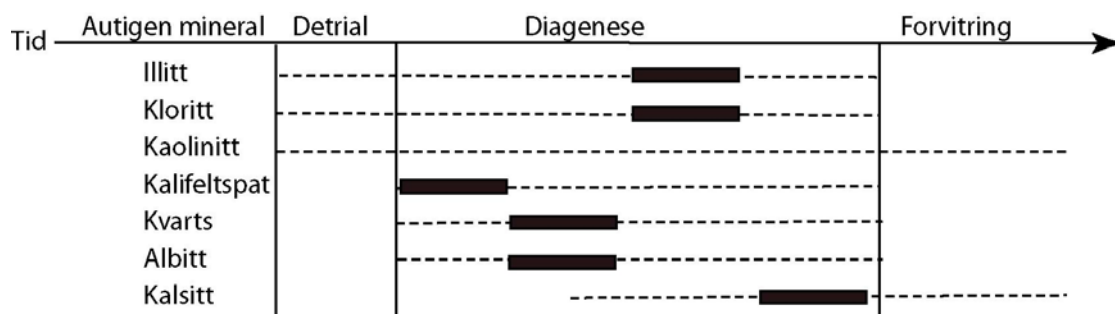
5.2 Resultater

Petrografen av de ulike litologiske enhetene som er studert i denne hovedoppgaven er presentert i de følgende avsnittene. Først beskrives bakgrunnsedimentene som grenser til Witkop I og deretter er bergartene fra ventkomplekset beskrevet. Deretter er litologiske anomalier inni ventfyllet presentert. Etterpå følger det en beskrivelse av de ulike klastene og fragmentene som er observert i de ulike litologiene. Videre følger beskrivelse av porøsitetforskjellene og fordelingen av leirmineraler. Det må sies at de fleste prøvene er kraftig forvitrede slik at det har vært problematisk å tolke teksturen. Dette gjelder særlig leirmineralene, som det har vært vanskelig å tolke hvorvidt de er detriale eller autigene.

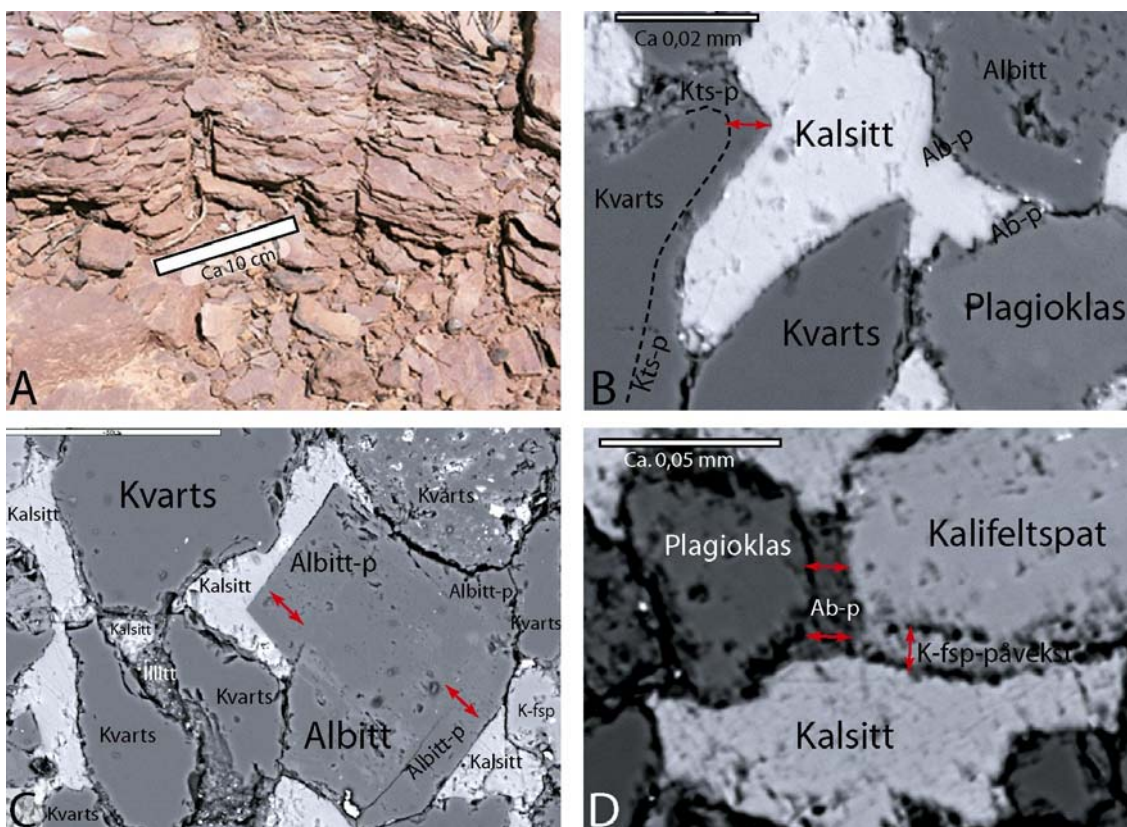
5.3 Bakgrunnsedimenter (røde slambergarter)

Bergartene rundt det hydrotermale ventkomplekset, Witkop I, består av en sekvens av vekslende lag av røde slambergarter og kremgule sandsteiner. Dette avsnittet omhandler en petrografisk beskrivelse av de røde slambergartene, og er basert på prøvene KO1S-21 og -37. Nærmere beskrivelse av prøvene ligger i appendikset, 10.15 og 10.18.

Disse røde bergartene klassifiseres som sandholdige siltstein som består av *detriale* korn av kvarts, albitt, kalifeltspat og plagioklas. *Autigene* mineraler er albitt, kvarts, kalifeltspat, kalsitt, illitt, kloritt. Fra to XRD-analyser er det også observert kaolinitt. Etersom prøvene er kraftig forvitrede er det vanskelig å avgjøre hvorvidt leirmineralene er detriale, og når det gjelder kaolinitt kan det være et resent forvittringsprodukt. *Aksessoriske* detriale mineraler er rutil, ilmenitt, zirkon, jernoksider, biotitt og muskovitt. Dagens porøsitet er ca. 3 % for prøve KO1S-21 og ca. 6 % for prøve KO1S-37 (basert på SEM-kartlegging og analyser fra NGI, metoder se kapittel 3), og begge prøvene inneholder poikilotopisk kalsittsement. Kornstørrelsen er ca. 0,02 mm, mellomsilt. Kornformen er subkantete. Bergarten har god sortering og har vært utsatt for svak kompaksjon. Tidsforløpet for de autigene fasene vises i figur 5.2, og figur 5.3 er bilder som viser denne sammenhengen.



Figur 5.2: Tidsforløpet for autigene faser for de røde slambergartene fra Elliot fm. som omgir Witkop I. Basert på petrografianalyser fra SEM og XRD.



Figur 5.3: Bilder fra den røde slambergarten fra Elliot formasjonen som omgir Witkop I. **A:** Et feltbilde over litologien fra logg 2. **B:** Et BSE-bilde fra prøve KO1S-37 som viser tilfeldig fordelt kalsitt som fyller porerom og som postdaterer autigen vekst av albitt og kvarts, basert på CL. **C:** BSE-bilde av prøve KO1S-37 som viser euhedral vekst av albitt. **D:** BSE-bilde av prøve KO1S-21 som viser autigen vekst av kalifeltspat som prelater utfellingen av kalsitt.

Av de autigene fasene er det hovedsaklig kalsitt som virker som porefyllende materialer, men også albitt virker noe porereduserende. Autigen albitt forekommer både som anhedrale og euhedrale påvekster på detriale albitt- eller plagioklaskorn (figur 5.3 B og C). Mens autigen kvarts for det meste forekommer som anhedrale påvekster på detriale kvartskorn (figur 5.3 B). Euhedrale kvartspåvekster er ikke observert. Det er observert lite autigen kalifeltspat, dog forekommer dette som påvekster på detriale kalifeltspatkorn (figur 5.3 D). Autigen albitt grenser til både autigene og detriale faser av kalifeltspat, slik at autigen kalifeltspat prelater autigen albitt. Autigen kalsitt forekommer som et porefyllende poikilotopisk og tilfeldig fordelt ("patchy calcite") sement som grenser både til detriale og autigene faser av albitt, kvarts og kalifeltspat (figur 5.3 B, C og D). Autigen kalsittsement postdaterer dermed de autigene fasene av albitt, kvarts og kalifeltspat. Utfellingen av kalsittsement har pågått i minst to episoder ettersom CL-bilde viser en fargenyans mellom rød og oransje i sementen. Dessverre lyktes det ikke å skille disse to typene av kalsittsement kjemisk (figur 10.15 A).

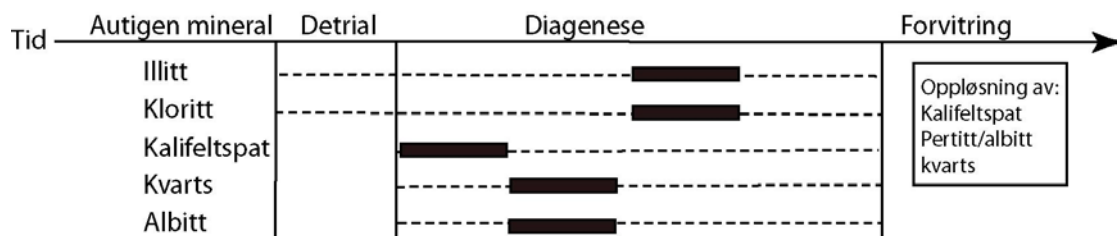
5.4 Bakgrunnsedimenter (kremgule sandsteiner)

Dette avsnittet omhandler de kremgule sandsteinene som vekselvis ligger mellom de røde slambergartene i området rundt det hydrotermale ventkomplekset Witkop I. Beskrivelsen av denne typen bergart er basert på studium av prøvene KO1S-1, -8, -22 og -32 som kommer fra samme lagenhet, og av prøvene KO1S-6, -12 og -26 som kommer fra en annen, dog samme, lagenhet litt lenger oppe i stratigrafien, samt prøve KO1S-3. Appendiks 10.16, 10.19-10.26 gir en nærmere beskrivelse av petrografien.

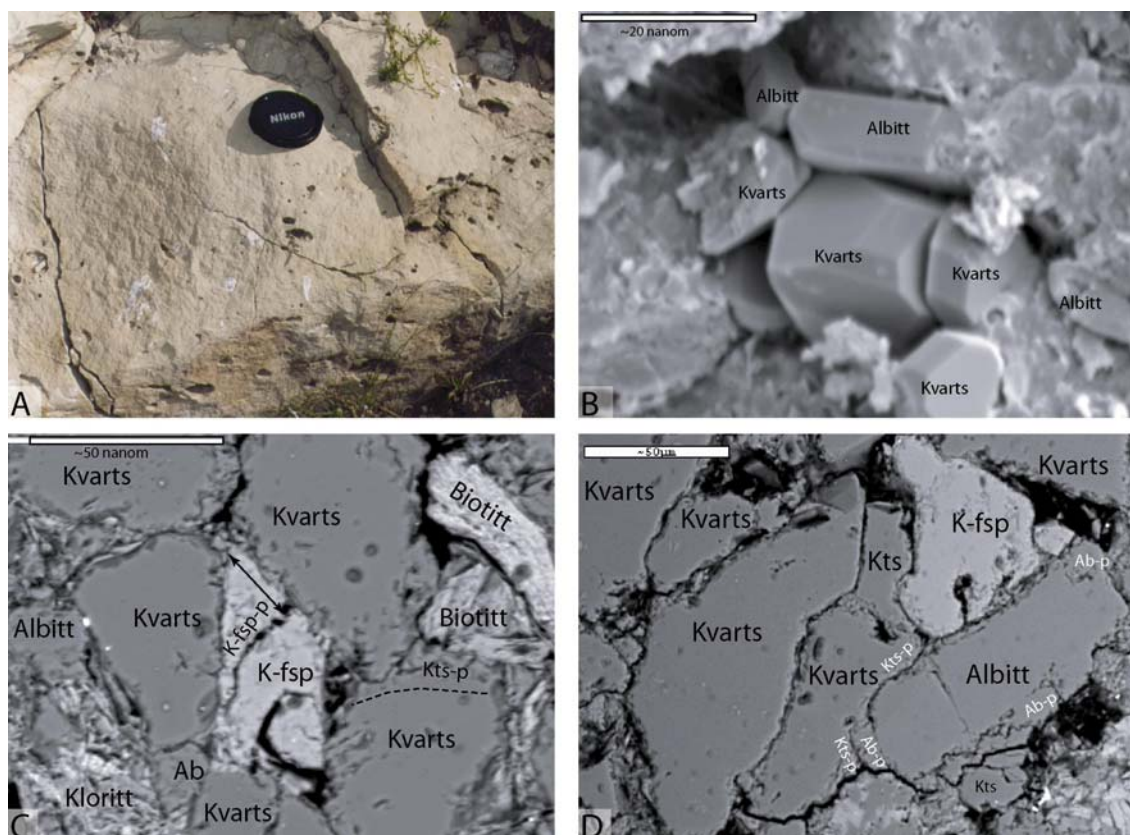
De kremgule sandsteinene klassifiseres som arkose bestående av *detriale* korn av kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat. Disse sandsteinene er mørkere i farge enn sandsteinene som fyller ventkomplekset. Figur 5.4 er en oversikt over tidsforløpet til de autigene mineralene mens figur 5.5 er bilder som viser denne sammenhengen.

De *autigene* fasene består av albitt, kvarts, kalifeltspat, illitt og kloritt. Det er vanskelig å tolke hvorvidt leirmineralene illitt og kloritt er *detriale* eller *autigene*. Dersom leirmineralene er *autigene* er det i tillegg vanskelig å se hvorvidt de er resultat av et omvandlingsprodukt eller hvorvidt de er felt ut in situ av porevannet. *Aksessorier* (*detriale*) er rutil, titanitt, ilmenitt, apatitt, jernoksider, zirkon, biotitt og muskovitt. Kornstørrelsen er ca. 0,1 mm, finkornet finsand. Bergarten har god sortering, svak til moderat kompaksjon og meget kantete kornform. Dagens porøsitet ligger mellom 7-13 % (basert på SEM-kartlegging og analyser fra NGI, metoder se kapittel 3) hvorav de fleste prøvene måler rundt 10 % porøsitet.

Av de *autigene* fasene er det observert mest albitt og kvarts. Autigen kalifeltspat er det lite av, og det er ikke observert i alle prøvene. Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på *detriale* kalifeltspatkorn, og virker stedvis som et porefyllende materiale (figur 5.5 C og 10.20 C). Autigen albitt forekommer som påvekster på *detriale* korn av albitt eller plagioklas. Autigen kvarts forekommer som anhedrale og euhedrale påvekster på *detriale* kvartskorn (figur 10.22 B). Majoriteten av prøvene viser vekselvis vekst av euhedrale krystaller av kvarts og albitt i porerom (figur 5.5 B). Veksten av albitt og kvarts har dermed pågått omtrent samtidig. Både autigen kvarts og albitt virker stedvis som porefyllende materialer. Autigen illitt forekommer i trådform som et porefyllende materiale som grenser til *detriale* og *autigene* faser av kalifeltspat, albitt og kvarts. Stedvis ligger illitt i midten av en pore, formet som et *detrialt* korn som en slags pseudomorf. Illitt forekommer også som et belegg rundt *detriale* og *autigene* faser av albitt, kvarts og kalifeltspat. Autigen kloritt forekommer i trådform som et porefyllende materiale, og er ikke gjennomgående i hele prøven.



Figur 5.4: Tidsforløpet for de autigene fasene for de kremgule sandsteinene som omgir Witkop I. Basert på petrografianalyser fra SEM og XRD.



Figur 5.5: Bilder som viser den kremgule sandsteinen som omgir Witkop I. **A:** Feltbilde over litologien, fra logg 2. **B:** SEI-bilde fra prøve KOIS-6. Det viser euhedral krystallvekst av kvarts og albitt om hverandre. **C:** BSE-bilde av prøve KOIS-3, som viser hvordan autigen kalifeltspat virker som et porefyllende materiale. **D:** BSE-bilde av prøve KOIS-26 som viser porefyllende autigen kvarts.

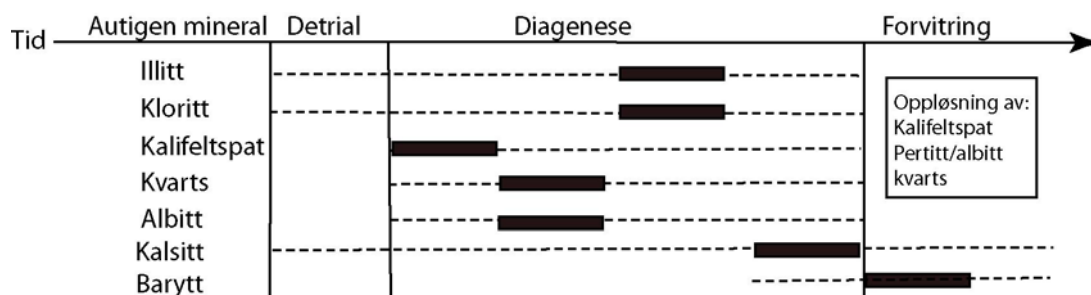
Noen av prøvene inneholder klaster av ulike slag, og disse er beskrevet i 5.8.

5.5 Ventsandsteiner fra Witkop I

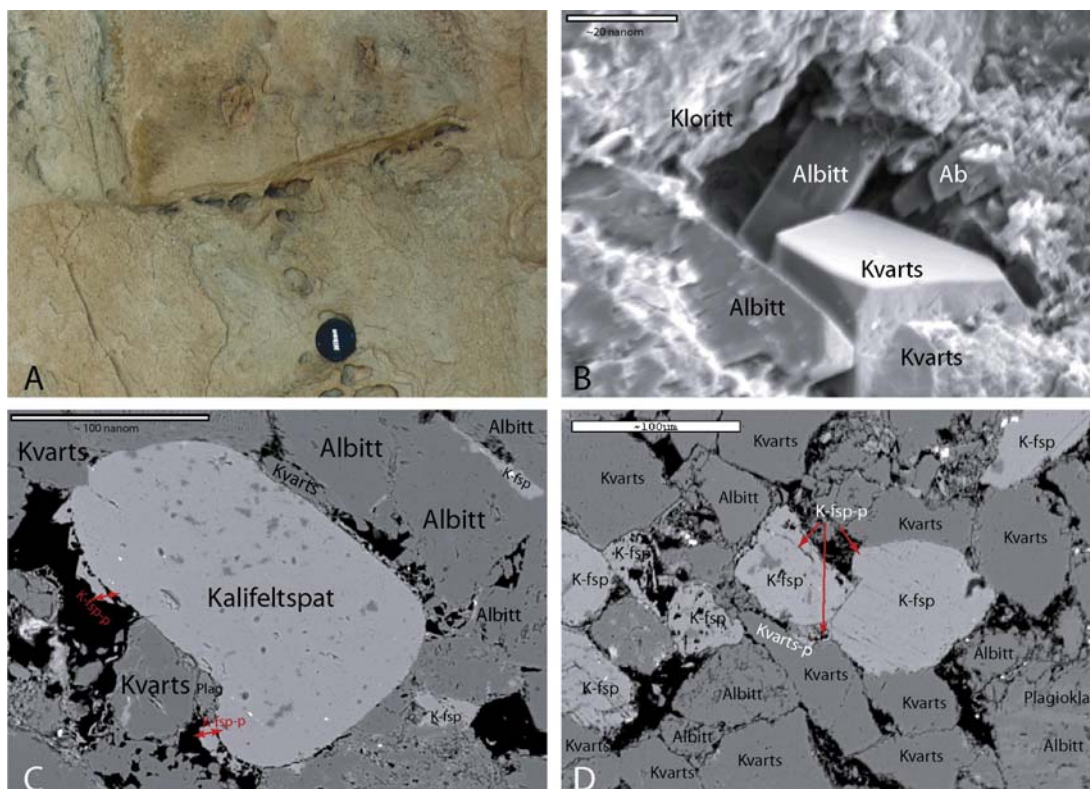
Fyllet i ventkomplekset Witkop I, består av kremgul og porøs sandstein. Petrografibeskrivelsen er her basert på prøvene KOIS-30, 45, -46, -48, -50, -31 og -51. Nærmere petrografibeskrivelser fra hver enkle prøve finnes i appendiks 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 10.13 og 10.14.

Ventsandsteinene fra ventkomplekset Witkop I er lyse og kremgule i farge, og består av *detritale* korn som kvarts, plagioklas, kalifeltspat og klassifiseres som arkose. *Autigene* faser består for det

meste av albitt og kvarts og litt kalifeltspat, illitt og kloritt. *Aksessoriske* autigene faser er barytt. Andre detriale *aksessorier* er rutil, ilmenitt, zirkon, titanitt, jernoksider, biotitt og muskovitt. Kornstørrelsen ligger mellom 0,16 -0,25 mm, grovkornet finsand. Bergarten er godt sortert og svak til moderat kompaktert. Kornformen er subkantete, og dagens porøsitet ligger mellom 11-15%. På grunn av forvitring er det vanskelig å si noe om tidsforløpet for leirmineralene, hvorvidt de er detriale eller dannet under begravelsesdiagenesen, eller hvorvidt de er resent dannet etter erosjon. Det er også vanskelig å si hvorvidt leirmineralene er resultat av omvandlede mineraler in situ eller hvorvidt de er felt ut av fluider i porerommene. Figur 5.6 er en oversikt over tidsforløpet for de autigene mineralene, mens figur 5.7 viser petrografibilder som viser denne sammenheng.



Figur 5.6: Tidsforløpet for de autigene mineralene fra litologien som fyller det hydrotermale ventkomplekset Witkop I. Det har vært litt problemfullt å tolke veksten av leirmineralene og oppløsningen av kalifeltspat, pertitt/albitt og kvarts pga. forvitring.



Figur 5.7: Bilder av litologien som fyller det hydrotermale ventkomplekset, Witkop I. **A:** Bilde av litologien i felt. Overflaten har utvitrede hulrom. **B:** SEI-bilde av prøve KO1S-50, som viser vekselvis euhedral vekst av kvarts og albitt. **C:** BSE-bilde av prøve KO1S-30, som viser autigen vekst av kalifeltspat på et detrialt kalifeltspatkorn. **D:** BSE-bilde av prøve KO1S-48, som viser autigen kalifeltspatpåvekst samt hvorledes prøven er forvitret.

Teksturen til denne bergarten er meget lik teksturen for de andre kremgule sandsteinene i området som grenser til Witkop I. Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på detriale kalifeltspatkorn der det stedvis fungerer som et belegg og andre steder som et porefyllende materiale (figur 5.7 C). Den autigene kalifeltspaten omringer detriale kalifeltspatkorn som inneholder sekundær porøsitet pga. oppløste pertittlameller (figur 10.4 D). Oppløsningen av pertittlameller postdaterer dermed den autigene kalifeltspatveksten. Autigen albitt og autigen kvarts forekommer som euhedrale krystaller som vekselvis fyller porerom (figur 5.7 B). Autigen albitt forekommer som påvekster på detriale albitt- eller plagioklaskorn, og opptrer både som anhedrale påvekster og som et porefyllende materiale. Autigen kvarts forekommer som påvekster på detriale kvartskorn, både som anhedrale og euhedrale krystaller og også som et porefyllende materiale som omslutter både detriale og autigene faser av kalifeltspat. Autigen kvarts og autigen albitt har dermed vokst omtrent samtidig og postdaterer den autigene veksten av kalifeltspat. Autigen illitt forekommer i trådform og opptrer både som et belegg rundt detriale og autigene faser av kalifeltspat, albitt og kvarts, samt rundt detriale faser av plagioklas. Illitt er også observert som en pseudomorf etter et detrialt korn (figur 10.4 C). I slike tilfeller ligger illitten i midten av et porerom i en trådform som fyller et område som likner på et detrialt korn. Kalifeltspat er deretter blitt noe oppløst og dannet sekundær porøsitet. Det er observert porerom der poreveggen er dekket av illitt og at det finnes resterende kalifeltspat igjen i porerommene. Stedvis er det også blitt dannet sekundær porøsitet ved at detriale kalifeltspatkorn er oppløst mens et kalifeltspatbelegg utgjør poreveggen (figur 10.7 C). Autigen kloritt forekommer i trådform som et porefyllende materiale, og det er ikke gjennomgående i hele prøven. Det antas at autigen kloritt postdaterer autigen illitt ettersom kloritten er plassert i mer sentrale deler av porerommene mens illitt grenser til poreveggen. De fleste prøvene er noe forvitret og sekundær porøsitet er dannet som følge av oppløsning. Det er de detriale fasene av kalifeltspat, samt både autigene og detriale faser av albitt, som mest har forårsaket sekundær porøsitet. Autigen barytt (figur 10.4 C) forekommer aksessorisk som en sement og som et porefyllende materiale. Utfelling av baryttsement er av en sendiagenetisk hendelse ettersom det grenser til autigene faser av kvarts og illitt, og ettersom det ligger i de mest sentrale delene av porerommene. Autigene framboidale jernoksider forekommer aksessorisk, og det er ikke observert i alle prøvene.

Det er ikke observert autigen kalsitt i denne typen litologi. Derimot er det funnet autigen kalsitt i noen særegne litologier som ligger inni ventfyllet, som er beskrevet i kapittel 5.6.

Noen av prøvene inneholder klaster av ulike slag. Klastene er beskrevet i 5.8.

5.6 Særegne bergarter fra Witkop I

Witkop I består ikke kun av kremgule sandsteiner med lik petrografi som beskrevet i 5.5. Tre andre typer bergartsanomalier er observert fra ventfyllet i ventkomplekset Witkop I. Den ene prøven (KO3HS-27) kommer fra en tverrgang som kutter i den kremgule sandsteinen som ellers fyller ventkomplekset. Denne tverrgangen består av breksje med ulike fragmenter (figur 5.8), inkludert sandsteinsfragmenter. En annen type bergart, som KO1S-40 og -41, er hentet fra en kalsittementert pipestruktur som kutter i den kremgule sandsteinen som ellers fyller ventkomplekset (figur 5.9). Den tredje typen av bergart er hentet fra en linse i Witkop I som består av noe grovere materiale som likner på rester etter omvandlede bergartsfragmenter. KO1S-42 og KO3HS-29 er prøver hentet fra denne linsen (fig. 5.10).

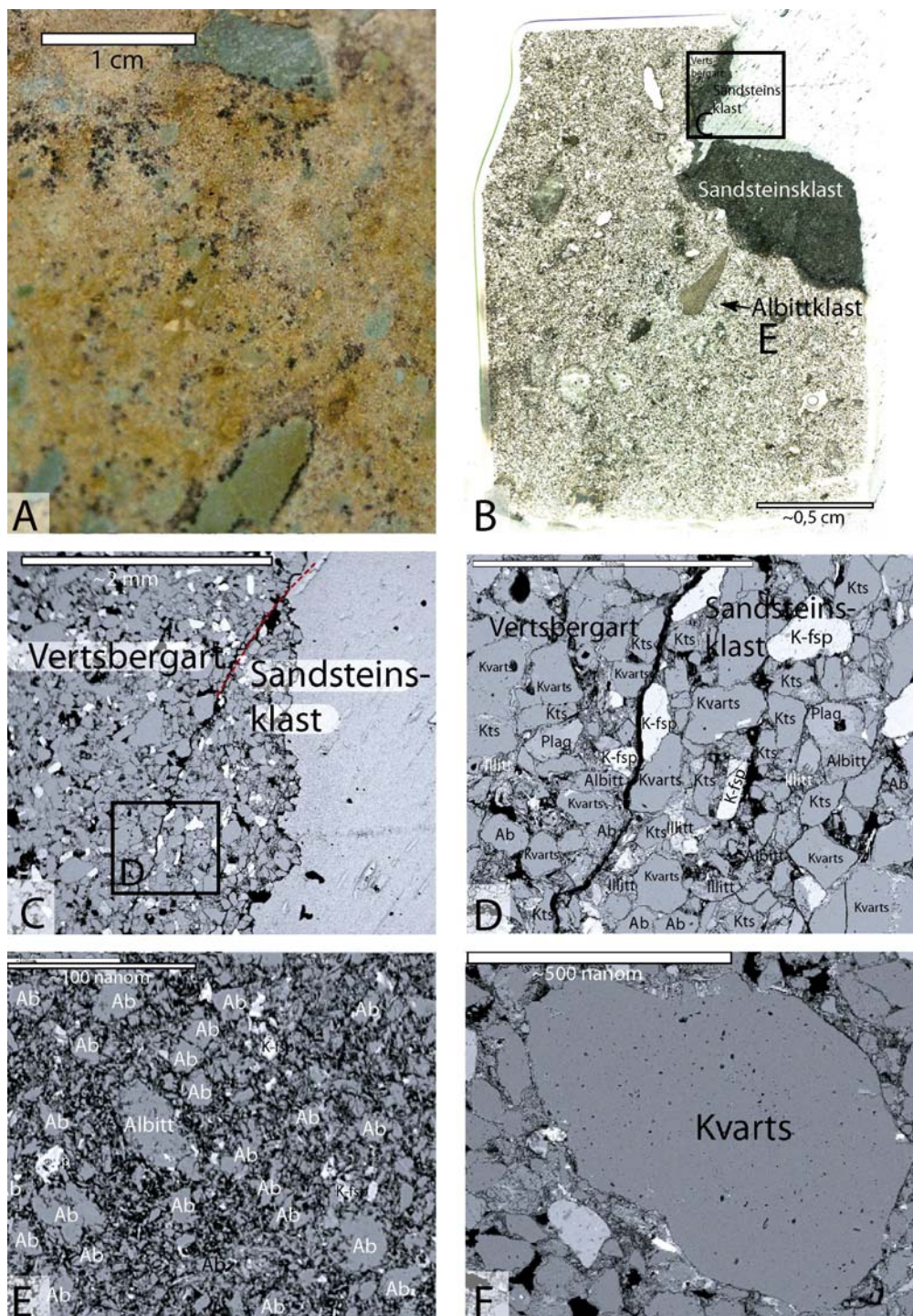
Breksje-tverrgang (KO3HS-27):

Denne bergarten består av mange kantete sandsteinsfragmenter av ulike størrelser som er fra 0,2-2,0 cm store. Fragmentene varierer i farge fra hvit, grå, brun til gul. Grunnmassen består av kremgul sandstein (figur 5.8, figur 4.13). For nærmere beskrivelse av prøven se appendiks kapittel 10.10 og 5.8.

Den kremgule grunnmassen består hovedsaklig av kvarts-, albitt-, plagioklas- og kalifeltspatkorn, mens aksessorier består av rutil, ilmenitt, zirkon, jernoksider og muskovitt. Autigene mineraler består av albitt, kvarts, kloritt og illitt. Kornstørrelsen er ca. 0,1 mm, grovkornet grovsand. Bergarten er veldig dårlig sortert og kornformen er kantet, og den er svakt kompaktert. Dagens porøsitet er ca. 12 %. De autigene mineralene i den kremgule grunnmassen viser at autigen kvarts forekommer i anhedrale former og har vokst på detriale kvartskorn. Autigen albitt forekommer som anhedrale påvekster på detriale albittkorn. Verken autigen kvarts eller autigen albitt virker som store porereduserende materialer. Autigen kloritt og illitt forekommer som et porefyllende materiale og grenser til autigene faser av både albitt og kvarts. Kalifeltspat er stedvis oppløst slik at sekundær porøsitet er dannet.

Bergarten inneholder fire typer av fragmenter. Den ene typen består av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat som ligger flytende i en matriks (ca. 90 %) bestående hovedsaklig av illitt og biotitt (type-3-klast). Denne typen forekommer hyppigst. Den andre typen består også av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat som ligger flytende i en matriks bestående av illitt og biotitt. I denne typen er matriksandelen mindre, ca. 50 % (type-2-klast). Den tredje typen består nesten kun av små korn av albitt. I tillegg til albitt forekommer det, i et lite antall, korn av kalifeltspat og kvarts (type-5-klast). Den fjerde typen av fragmentene består av sandstein som likner grunnmassen,

bortsett fra at de inneholder litt mer matriks (type-7-klast). Disse fragmentene skilles fra grunnmassen ved at de inneholder mer leire og at fragmentkantene er tydelige og klare (se figurene 5.8 C, D og E).

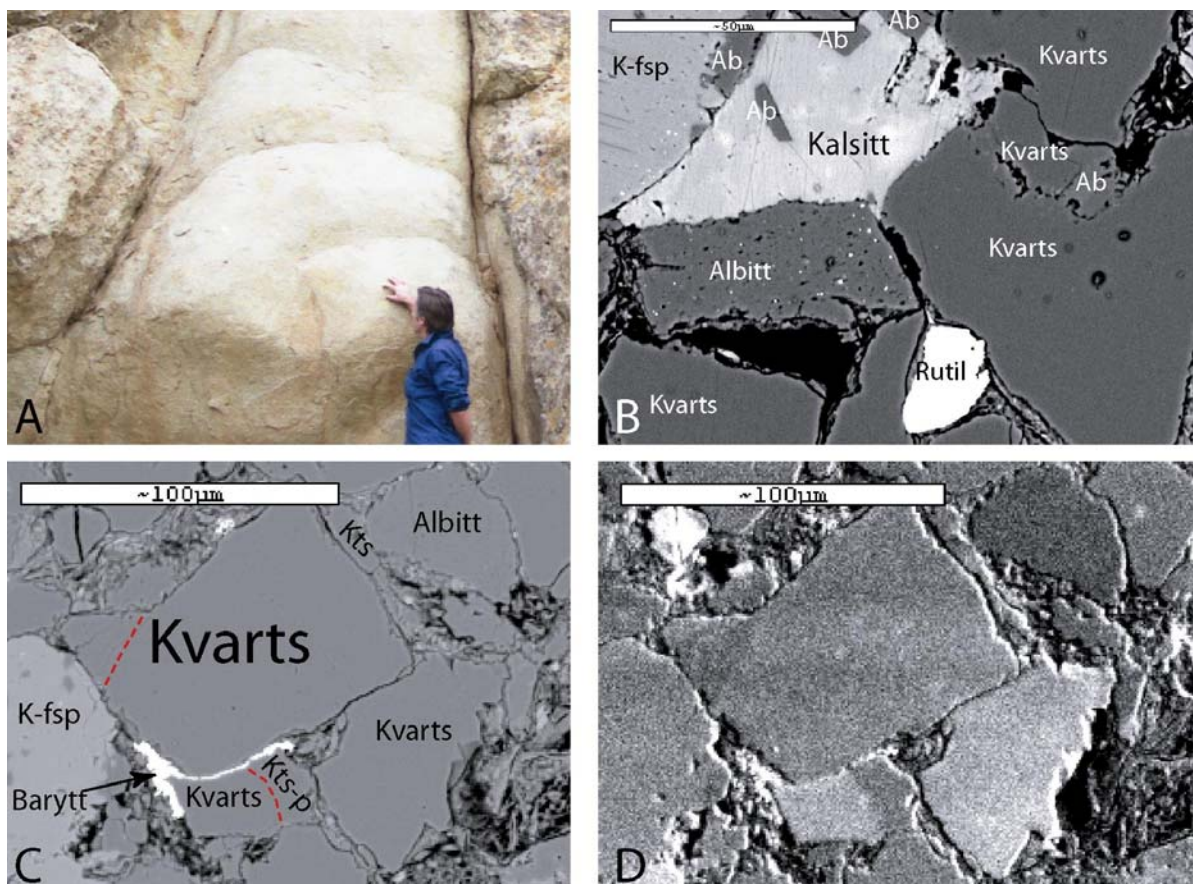


Figur 5.8: Bilder av en tverrgang som består av sedimentbreksje. **A:** Bilde av prøve KO3HS-27 i håndstykket. Prøven er sagt slik at den har en jevn overflate. **B:** Bilde av prøve KO3HS-27 i tynnslip som viser ulike klaster. **C:** BSE-bilde av prøve KO3HS-27, som er tatt fra rammen i B. Bildet viser grensen mellom en klast/fragment og vertbergarten. **D:** Et BSE-nærbilde av rammen i C. Sandsteinsklasten og vertbergarten er veldig like i tekstur og innhold. **E:** BSE-bilde av en albittklast fra B. Klasten består hovedsaklig av albitt men også mindre mengder av kalifeltspat. **F:** BSE-bilde av matriksen til prøve KO3HS-27. Den viser at prøven har meget ulike kornstørrelser og er dårlig sortert.

Kalsittementert pipestruktur (KOIS-40):

Denne bergartstypen er en lys gråaktig, finkornet og porøs sandstein. Den er lysere og mer finkornet sammenliknet med den kremgule bergarten som ellers fyller ventkomplekset (figur 5.9). I tillegg inneholder den kalsitt, i motsetning til ventfyllet (se figurene 5.9 B). For nærmere beskrivelse av prøven se appendiks kapittel 10.2.

Bergarten klassifiseres som arkose med *detriale* korn som hovedsaklig består av kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat. *Aksessorier* (detriale) består av apatitt, muskovitt, biotitt, barytt, ilmenitt, titanitt, zirkon, rutil, illitt, kloritt. *Autigene* mineraler er kvarts, albitt, kalsitt og aksessorisk barytt. Kornstørrelsen er ca. 0,2 mm, grovkornet finsand, og kornformen er kantet. Dagens porøsitet er ca. 12 %. Ettersom prøven er kraftig forvitret er det vanskelig å avgjøre hvorvidt leirminealene er detriale eller autigene.



Figur 5.9: Bilder av en kalsittementert sediementpipe-liknende struktur. **A:** Bilde av strukturen i felt (Jamtveit). **B:** BSE-bilde av prøve KOIS-40 som er hentet fra strukturen i A. Den viser hvorledes tilfeldig fordelt kalsitt ("patchy calcite") fyller porerom etter euhedral albittvekst. **C:** BSE-bilde av prøve KOIS-40. Ved sammenlikning av CL-bilde i **D** ser man mulig autigen kvartspåvekst.

De autigene fasene består hovedsaklig av kvarts og albitt, mens det forekommer autigen kalifeltspat i en liten mengde. Autigen kalifeltspat forekommer som autigene påvekster på detriale kalifeltspatkorn. Autigen albitt forekommer som både anhedral og euhedral påvekst på detriale albitt- eller plagioklaskorn og på kalifeltspatkorn (figur 5.9 B). Autigen kvarts forekommer både som euhedrale krystaller og som anhedrale påvekster på detriale kvartskorn (figur 5.9 C og D). Euhedrale krystaller av kvarts og albitt fyller porerom om hverandre, og har derfor vokst omtrent samtidig. Illitt og kloritt ligger nærmere poreveggen enn kalsittsementen, og predaterer derfor den autigene kalsitten. Autigen kalsitt forekommer som porefyllende sement og har stedvis godt utviklede romboedriske kløv. Kalsittsementen postdaterer albittpåveksten ettersom den omslutter euhedrale albittkrystaller i porerom. Kalsittsementen er ikke gjennomgående i hele prøven, men mer tilfeldig fordelt ("patcy calcite") (figur 5.9 B). Autigen barytt opptrer aksessorisk som sement (figur 5.9 C). Det ligger nærmere sentret av poren enn illitt og kloritt, og er derfor en sendiagenetisk fase. Som nevnt tidligere er de fleste prøvene kraftig forvitret, og derfor er det vanskelig å fastslå tidsforløpet for de autigene leirmineralene samt oppløsning av andre korn. I tillegg er det vanskelig å fastslå hvorvidt leirmineralfasene er felt ut in situ som et omvandlingsprodukt eller hvorvidt det er porevann som har felt ut disse fasene.

Linse med grovere materiale (KOIS-42 og KO3HS-29):

Denne bergarten er en sammensatt bergart som består av lys kremgul sandstein med klaster som består av kalsitt og leire. Disse klastene kan være restene etter bergartsfragmenter. KOIS-42 er en prøve hentet fra denne linsen. KO3HS-29 er også en prøve hentet fra denne linsen, men fra en sone som består av kittaktige, mørkegråe, "oppsmuldrede" fragmenter som lett kunne skrapes ut fra linsen (figur 5.10 A og 4.12).

KOIS-42: Dette er en finkornet lysegrå og hvitaktig sandstein med forvitrede hulrom på overflaten. Det er en meget porøs sandstein. Prøven inneholder gråe og hvite klaster, og noen av dem inneholder kalsitt. Denne bergarten er mer hvitaktig enn den kremgule sandsteinen som fyller ventkomplekset, beskrevet i 5.5. For nærmere petrografisk beskrivelse av prøven se appendiks kapittel 10.4.

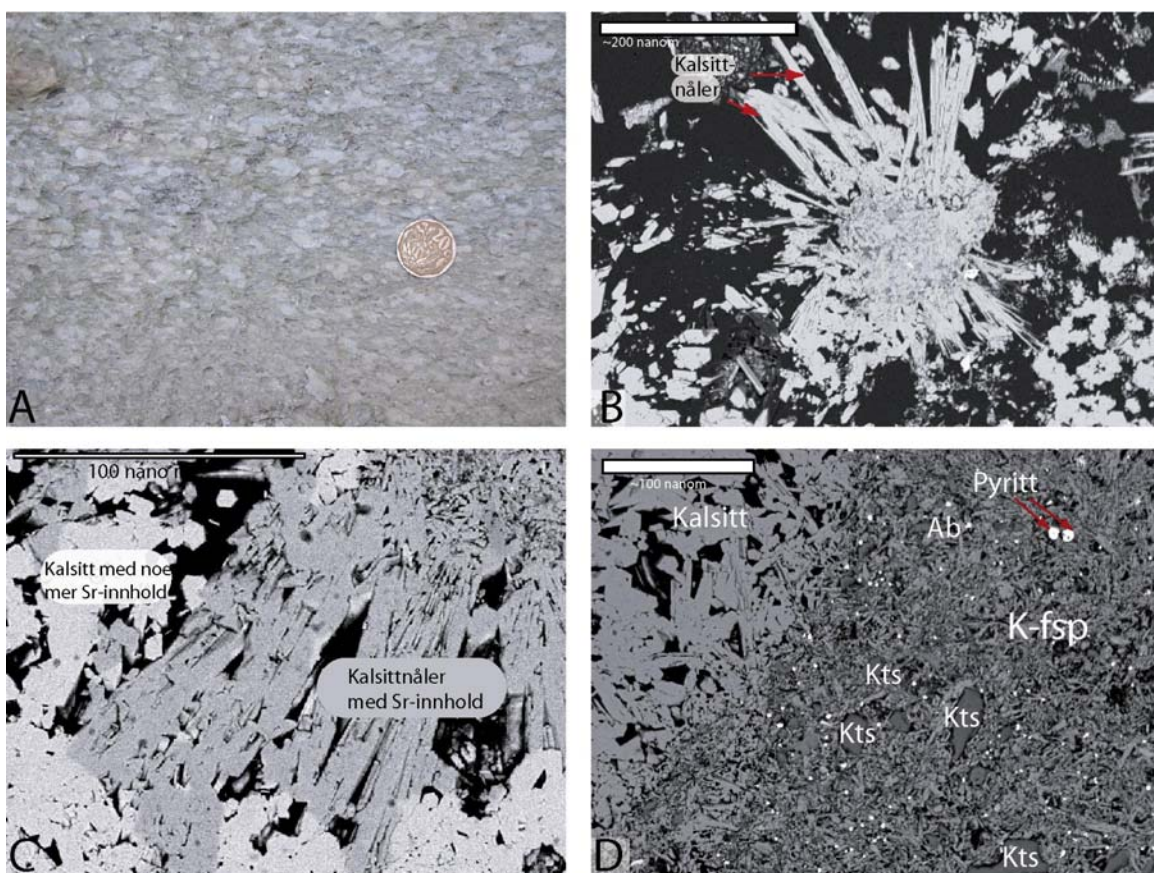
Bergarten består hovedsaklig av *detriale* korn av kvarts, albitt, kalifeltspat og plagioklas. *Aksessorier* er zirkon, jernoksider, rutil, biotitt, titanitt, ilmenitt, barytt og apatitt. *Autigene* mineraler er kalsitt, kvarts, kalifeltspat, illitt og aksessorisk barytt. Kornstørrelsen er ca. 0,2 mm, og kornformen er veldig kantete. Bergarten er dårlig sortert, svak kompaktert og har en porøsitet på ca. 12%. Det er observert to typer klaster i denne prøven. Den ene typen består av kalsitt i

matriksen, mens den andre typen består av leirmineraler som illitt og kloritt i matriksen. Bergartsteksturen likner bergarten KO1S-40, i og med at den inneholder kalsitt. Kalsittsementen i KO1S-42 har derimot ikke godt utviklede romboedriske kløv.

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn med pertittlameller. Autigen kvarts forekommer som påvekst på detriale kvartskorn, og det grenser til autigen kalifeltspat. Autigen kvarts postdateres derfor den autigene kalifeltspaten. Euhedrale krystaller av kvarts og albitt fyller vekselvis porerom, og veksten av disse har derfor pågått omtrent samtidig. Illitt forekommer både som et belegg rundt detriale korn og som et porefyllende materiale som ligger utenfor den autigene kvartsen og den autigene kalifeltspaten. Autigen illitt postdateres derfor autigen kvarts, albitt og kalifeltspat. Autigen kloritt opptrer sammen med illitt som et belegg rundt detriale korn og rundt kalifeltspatkorn med påvekst av kalifeltspat. Prøven er forvitret, og derfor er det problematisk å si hvorvidt leirmineralene er detriale eller autigene. Autigen kalsitt er tilfeldig fordelt ("patchy calcite") og forekommer som porefyllende mikrittisk sement uten romboedriske kløv. Kalsittsementen ligger i sentret av poren og grenser til autigen kvarts. Autigen kalsitt postdateres derfor autigen kvarts (figur 10.3 A). Autigen barytt forekommer i en liten mengde som både porefyllende materiale og som belegg på detriale korn av kvarts, albitt og kalifeltspat. Autigen barytt grenser mot en autigen klorittsøm som omringer et detrialt kalifeltspatkorn som siden er blitt oppløst. Autigen barytt er derfor et sendiagenetisk fenomen.

KO3HS-29: Denne bergarten skiller seg meget godt ut fra den kremgule sandsteinen som fyller ventkomplekset, beskrevet i 5.5 (figur 5.10). Denne bergarten er for det første mørkegrå i farge, kittaktig og lite kohesiv. For nærmere petrografisk beskrivelse av prøven se appendiks kapittel 10.11.

Prøven inneholder en kjerne bestående av mikrittisk matriks med korn av kvarts, albitt og kalifeltspat, med en kornstørrelse på ca. 0,1 mm. Den inneholder også mange små klumper av pyritt og jernoksider. Fra den mikrittiske kjernen har det vokst kalsitt-nåler ut mot porerommene. Kalsittnålene er opptil 0,25 mm lange og ca. 0,03 mm brede (se figur 5.10 B). Kjemiske analyser fra SEM-en viser at kalsitten inneholder noe strontium, og ved stor kontrast i BSE-bildet vises mørkere partier av kalsittnålene som har litt større innhold av strontium (figur 5.10 C).



Figur 5.10: Bilde av prøve KO3HS-29 som kommer fra en linse i Witkop I, som består av grovere materiale enn vertsbjergarten. **A:** Feltbilde av området der prøve KO3HS-29 er hentet fra. **B:** BSE-bilde av prøven som viser kalsittnåler som har vokst ut mot porerommene. **C:** BSE-bilde av prøve KO3HS-29 ved stor kontrast som viser en fargenyans. De mørkeste områdene inneholder litt mindre strontium i forhold til de lyse områdene. **E:** BSE-bilde som viser matriksen/kjernen fra der hvor kalsittnålene har vokst ut ifra. Kjernen inneholder små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat samt pyritt.

5.7 Modena I og Modena II ventkomplekser (KO3HS-25 og -26)

Bergartene fra disse ventkompleksene likner bergartene fra Witkop I ventkomplekset, i og med at ventfyllet består av kremgul og porøs sandstein. Begge bergartene klassifiseres som arkose med *detriale* korn bestående av kvarts, albitt, kalifeltspat og plagioklas. *Aksessorier* (*detriale*) består av rutil, biotitt, muskovitt, zirkon og jernoksider (*autigen*). *Autigene* mineraler er albitt, kvarts, kalifeltspat, illitt, biotitt, muskovitt og kloritt. Kornstørrelsen er ca. 0,16 mm, grovkornet finsand. Bergarten er svak til moderat kompaktert og moderat sortert. Kornformen er meget kantete, og porøsiteten er ca. 10 %. KO3HS-26 er noe dårligere sortert enn KO3HS-25 med største kornstørrelse på 0,7 mm. Se appendiks kapittel 10.28 og 10.29 for nærmere petrografisk beskrivelse av prøvene.

Prøvene KO3HS-25 og -26 har lik tekstur: Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på *detriale* kalifeltspatkorn og kan virke som et porefyllende materiale. Noen av

kalifeltspatpåvekstene inneholder også litt Na. Autigen illitt forekommer i trådform som et belegg rundt autigene faser av kalifeltspat. Både detrital og autigen kalifeltspat har blitt noe oppløst etter utfellingen av illittbelegget slik at noe sekundær porøsitet er dannet. Autigen kvarts forekommer som påvekster på detritale kvartskorn og virker som et porefyllende materiale. Det grenser til illittbelegg som omslutter kalifeltspat eller porerom med resterende kalifeltspat. Autigen kvarts postdaterer dermed autigen vekst av kalifeltspat og illittbelegg. Autigen kvarts forekommer også i euhedrale krystaller sammen med euhedrale albittkrystaller i porerom, noe som indikerer at de har vokst omtrent samtidig. Autigen albitt forekommer som anhedrale og euhedrale påvekster på detritale albitt- eller plagioklaskorn. Autigen illitt i trådform virker også som et porefyllende materiale. Det er observert jernoksider blant illitten som fyller porene (figur 10.24 D). Det er mulig at noe jernoxid ble felt ut samtidig med illitten. Porefyllende illitt grenser til både detritale og autigene faser av kvarts, kalifeltspat og albitt. Stedvis ligger illitt midt i en pore som en pseudomorf etter et detritalt korn, kanskje kalifeltspat, i stedet for å legge seg etter poreveggen. Autigen kloritt forekommer i trådform som et porefyllende materiale som grenser til illittbelegg som omslutter detritale kalifeltspatkorn. På grunn av forvitrede prøver er det problematisk å si hvorvidt leirmineralene er dannet før eller etter begravningsdiagenesen, eller begge deler. Dermed er det også vanskelig å si hvorvidt de er dannet in situ som et omvandlingsprodukt eller om de er felt ut av porevannet.

5.8 Klaster og fragmenter fra Witkop I, Modena I og Modena II, samt bergartene som omgir Witkop I

Ut av alle klastene som er observert er det identifisert sju typer klaster basert på matriksinnhold og type leirmineraler (figur 5.11). Kriteriet for å identifisere en klast er at prøven inneholder en liten mengde abnormal materiale, og at dette materialet ikke fyller porerom og former seg etter andre korn i prøven. Andre autigene faser kan derimot forme seg etter klasten.

Type 1:

Denne typen klast inneholder 90 % mikrittisk kalsitt i matriksen og er opp til 1,7 mm stor. Den inneholder korn som kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat som ligger flytende i matriksen. Denne typen er kun observert i prøven KO1S-42 (linse med grovere materiale i ventkomplekset Witkop I). Se figur 5.11A.

Type 2:

Denne typen klast har et matriksinnhold på ca. 50 % bestående av illitt eller illitt og kloritt. Den inneholder korn som kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat som ligger flytende i matriksen. Denne typen klast er kun observert i ventkomplekset Witkop I, figur 5.11B.

Type 3:

Denne typen klast har et matriksinnhold på ca. 50-90 % som består av illitt og biotitt (figur 5.11 C). Den inneholder korn som består av kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat som ligger flytende i matriksen. Klaster av type 3 er observert i de kremgule sandsteinene som ligger vekselvis med de røde slambergartene i nærområdet til Witkop I. De er også observert i prøve KO1S-42, linsen med grovt materiale i ventkomplekset Witkop I.

Type 4:

Denne typen klast har et matriksinnhold på ca. 60 % kun bestående av kloritt. Korn av albitt, kvarts og kalifeltspat ligger flytende i matriksen. Denne typen klast er funnet i prøve KO1S-12, en kremgul sandstein hentet fra nærområdet til Witkop I (figur 5.11 D).

Type 5:

Denne typen klast har ingen matriks. 95 % av klasten består av svakt oppløste albittkorn (figur 5.8 E). I tillegg inneholder prøven ca. 5 % korn av kvarts, albitt og kalifeltspat. Denne typen av klast er kun funnet i prøve KO3HS-27, breksjen som er plassert i ventfyllet til Witkop I.

Type 6:

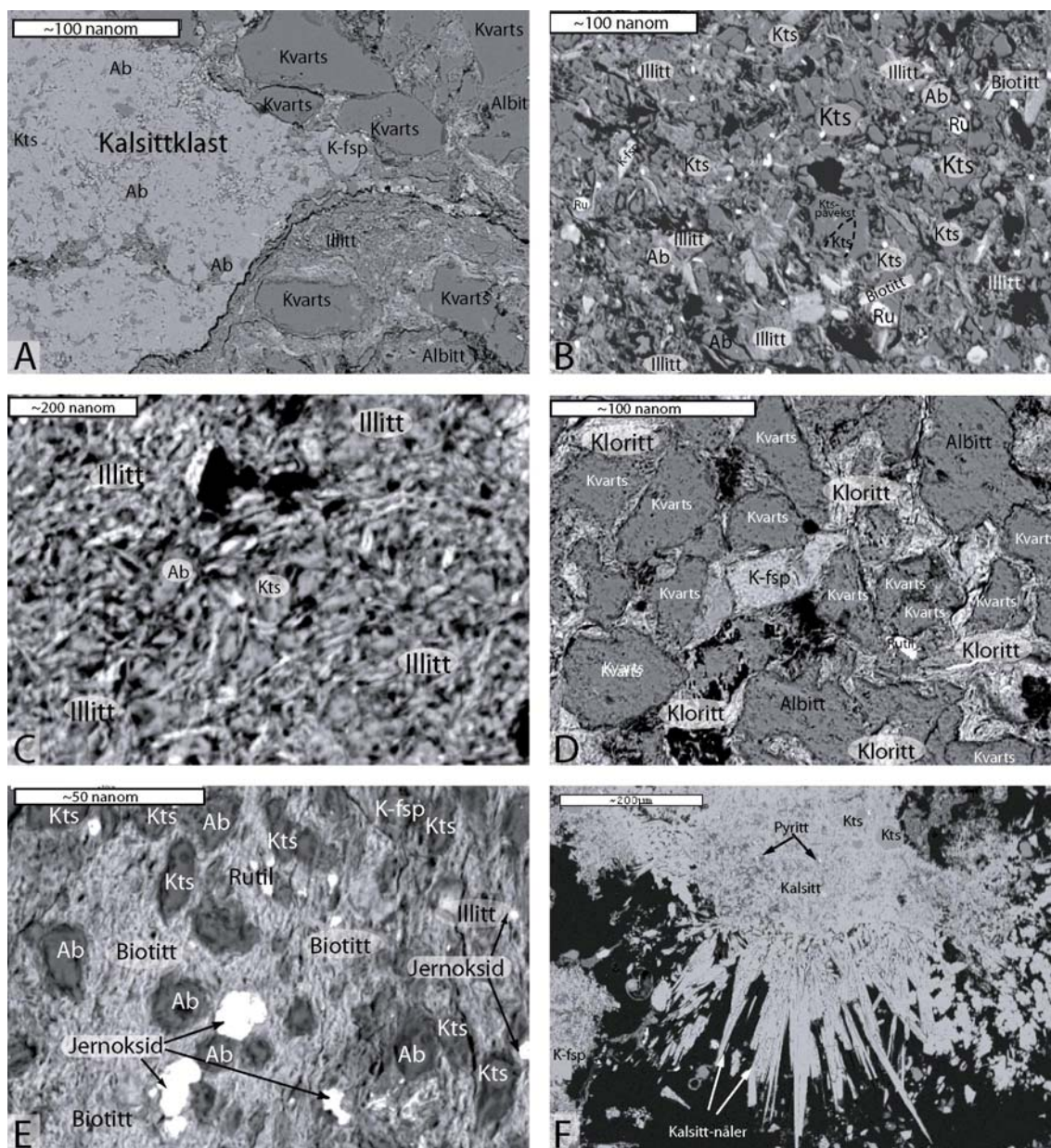
Denne typen klast består for det meste av biotitt, og litt illitt, i matriksen som utgjør ca. 70 % av klasten. Denne typen er bare funnet i prøve KO3HS-26, ventkomplekset Modena II, figur 5.11 E.

Type 7:

Denne typen klast består grovkornet grovsand der innholdet i denne klasten ikke tydelig kan skilles fra vertsbergarten, figur 5.8 C og D. Denne klasten har en tydelig kant som gjør den identifiserbar. Denne typen er kun observert i prøve KO3HS-27, breksjen fra Witkop I.

Type 8:

Denne klast-typen består av en kjerne som det har vokst autigene kalsittnåler ut ifra. Kjernen består av en mikrittisk matriks med korn av kvarts, albitt og kalifeltspat samt pyritt. Kalsitten inneholder også strontium (fra SEM). Denne klasten er kun observert i én prøve, KO3HS-29, som er hentet fra en linse med grovere materiale i Witkop I (figur 5.11 F).



Figur 5.11: BSE-bilder fra SEM som viser hva ulike klaster inneholder. **A:** Type-1-klaster som består av mikrittisk kalsitt uten kalsitt-nåler, med korn av albitt, kvarts og kalifeltspat, prøve KO1S-42. **B:** Type-2-klaster som består av 50% matriks, bestående av illitt eller kloritt og illitt, prøve KO1S-45. **C:** Type-3-klaster som består av 50-90% matriks bestående av illitt og biotitt, fra prøve KO1S-32. **D:** Type-4-klaster, med et matriksinnhold på ca. 60%, bestående av kloritt, fra prøve KO1S-12. **E:** Type-6-klaster består av ca. 70% matriks bestående av biotitt og kloritt, fra prøve KO3HS-26. **F:** Type-8-klaster fra prøve KO3HS-29, som består av kalsitt-nåler som har vokst ut fra en kjerne bestående av mikritt med korn av kvarts, albitt og kalifeltspat.

Kun én av prøvene inneholder så mye som tre typer av disse klasterne. Dette er prøve KO3HS-27 som kommer fra en tverrgang som kutter i ventfyllet, bestående av breksje. Disse tre typene er type 3, 5 og 7. De andre litologiene inneholder ingen eller maks to ulike typer av klaster. Det er ikke observert verken klaster eller fragmenter i de røde slambergartene. De kremgule sandsteinene som ligger vekselvis med de røde slambergartene i nærområdet til ventkomplekset Witkop I

inneholder derimot klaster av type 3 og 4. Ventsandsteinene fra Witkop I, utenom breksje-tverrgangen, linsen med grovt materiale og den kalsittsementerte sedimentære pipen, inneholder én type klast; type 2. Ingen andre sandsteiner, som er studert i denne hovedoppgaven, inneholder denne typen av klast. Ventsandsteinene i Modena I og II inneholder klaster av type 2 og 6. Den kalsittsementerte sedimentære pipe strukturen (KO1S-40) inneholder klaster av type 2. Den linsen med grovere materiale som ligger i ventfyllet til Witkop I inneholder merkvverdige anomalier av klaster. Denne typen bergart (KO1S-42 og KO3HS-29) inneholder type-1, type-2 og type-8-klaster.

Ut ifra avsnittet over er det klart at de klastene som forekommer hyppigst er av type 2, 3 og 4, nemlig klaster som har en matriks bestående av leirmineraler som illitt og kloritt og biotitt. Abnorme klaster som skiller seg ut fra de øvrige er spesielt type 1, 5 og 7. Type 1 klasten som består av ca. 90 % mikrittisk kalsitt i matriksen er kun observert i én prøve (KO1S-42). Denne prøven er hentet fra en av de særskilte bergartene i ventfyllet til Witkop I, nemlig fra linsen med grovt materiale. Klaster av type 5 og 7 er kun observert i én prøve, som også er hentet fra ventfyllet i Witkop I. Disse klastene er funnet i prøve KO3HS-27, breksje-tverrgangen. Det er ikke observert klaster som hovedsakelig består av albitt eller fragmenter av sedimentære bergarter i noen av de andre prøvene. Type-8-klasten er kun observert i prøve KO3HS-29.

5.9 Sammenlikning av sementering

Herunder følger en beskrivelse av de autigene fasene, hvorvidt de forekommer som påvekster eller sement. Det forklares også hvorvidt det forekommer forskjeller i måten de autigene fasene har vokst i de ulike litologiene.

Kvartssementering

I noen bergarter er det både anhedrale og euhedrale kvartspåvekster på detriale kvartskorn, og den autigene kvartsveksten virker som et porefyllende materiale. Alle de kremgule sandsteinene, både de som fyller ventkompleksene Witkop I, Modena I og Modena II, og de som ligger i nærområdet til disse ventkompleksene, inneholder euhedrale kvartspåvekster på grunn av stor porøsitet. Derimot inneholder røde slambergartene kun anhedrale påvekster av kvarts, der porøsiteten er lavere.

Albittsementering

Den autigene veksten av albitt forekommer som påvekster på enten detriale albitt- eller plagioklaskorn. Autigen albitt forekommer både som anhedrale og euhedrale vekster, og virker som en porefyllende sement stedvis. Porereduserende og autigen albitt er funnet i både de kremgule sandsteinene fra alle ventkompleksene, samt de kremgule sandsteinene fra bergartene i

nærområdet til Witkop I. Autigen albitt forkommer for det meste som anhedrale påvekster i de røde slambergartene hvor den porefyllende og porereduserende sementen er liten.

Kalifeltspatsementering

Den autigene kalifeltspaten forekommer for det meste som anhedrale påvekster på detriale kalifeltspatkorn. Stedvis ligger den autigene kalifeltspaten som et belegg rundt de detriale kalifeltspatkornene. Autigen kalifeltspat er stedvis observert å fungere som et porefyllende og porereduserende sement i de kremgule sandsteinene. I disse tilfellene er den autigene kalifeltspaten lokal i prøven og ikke gjennomgående i hele bergarten. Det er observert lite autigen kalifeltspat de kremgule sandsteinene, og enda mindre i de røde slambergartene.

Kalsittsementering

Det er hovedsakelig to typer kalsittsementeringer som er observert i prøvematerialet: poikilotopisk sement, som omslutter detriale korn og er gjennomgående i hele prøven, som kan ha både utviklede kløv (sparittisk) uten utviklede kløv (mikrittisk). Den andre typen kalsittsementering er tilfeldig fordelt ("patchy calcite") som er lokalt utfelt kalsitt som er fordelt stedvis i prøve. Den sistnevnt kalsittypen forkommer både sparittisk med utviklede romboedriske kløv og mikrittisk uten kløv. I tillegg forekommer det en tredje type med autigen kalsitt, og det er en type der kalsitten forekommer i nåleform og som har vokst ut mot en åpen pore. Denne typen kalsittvekst er kun observert i én prøve; KO3HS-29 (Se figur 5.10 B).

Sparittisk poikilotopisk kalsittsement er kun observert i de røde slambergartene. Kalsittutfellingene i de røde slambergartene kan også være uten kløvdannelse, men de er alle poikilotopiske. Prøver som inneholder kalsitt som er tilfeldig fordelt ("patchy calcite") er innhentet fra de særegne bergartstypene (kapittel 5.6) som forekommer inni ventfyllet til Witkop I. Dette gjelder prøvene KO1S-40 og -41, som er hentet fra den kalsittsementerte sedimentære pipestrukturen, og prøve KO1S-42, som er innhentet fra linsen som inneholder grovere materiale enn vertsbergarten. Den nålformede autigene kalsitten er innhentet fra samme sted som KO1S-42, innenfor en sone med ikke-kohesivt materiale. I tillegg er det observert en kalsittåre fra logg 1, prøve KO1S-2, som består av godt utviklede og perfekte krystaller. De kremgule sandsteinene både fra ventkompleksene Witkop I, Modena I og II, og fra omliggende sedimenter inneholder ingen former for kalsittutfellinger.

Baryttsementering

Baryttsementering forekommer aksessorisk som små utfellinger i "klumpform" langs soner eller "kanaler" som ligger mellom en klast og dens vertsbergart. Denne typen av baryttforekomst er funnet i én ventsandstein (prøve KO1S-42), som inneholder klaster, fra Witkop I. Det er også

betraktelig mindre klorittinnhold enn alle de andre prøvene (bortsett fra de røde slambergartene som ikke har kloritt).

5.11 Porøsitet

Årsaken til porøsitet kan være mangel på utfelling av autigene faser (primær porøsitet), oppløsning av detriale korn eller autigene faser (sekundær porøsitet) eller en blanding av de to. Mengden av porøsitet avhenger også hvor fritt autigene faser kan vokse. Hvis kornene har et belegg av, for eksempel, et leirmineral, kan dette hindre reduksjon av primær porøsitet. Porøsiteten av de ulike litologiene er målt ved hjelp av SEM-kartlegging og analyser fra NGI, metoder se kapittel 3.

De røde slambergartene har lavest porøsitet på ca. 3-5,85 %, mens de kremgule sandsteinene i nærområdet til Witkop I har noe større porøsitet som ligger på ca. 7-13,23 %. Ventsandsteinene som fyller Witkop I har størst porøsitet på ca. 11-15%. Ventsandsteinene som fyller Modena I og II har porøsitet som ligger rundt 10 %.

Årsaken til den lave porøsiteten for de røde slamsteinene er hovedsaklig utfelling av kalsitt i porerommene. Kalsitten opptrer som et porefyllende og porereduserende poikilotropisk sement som er gjennomgående i hele prøven. De røde slambergartene har stedvis et illittbelegg på de detriale kornene. Albitt og kvarts har vokst fra de detriale korna der det ikke finnes illittbelegg. Dette kan tyde på at utfelling av illittbelegget kan ha hindret autigen vekst av kvarts og albitt i noen grad. Den autigene veksten av kvarts er forholdsvis liten sammenliknet med den autigene veksten av albitt. Euhedrale krystaller er kun observert hos albitt. Autigen illitt opptrer kun som belegg og ikke som et porefyllende materiale. De røde slambergartene er noe forvitret, og ca. 99% av porøsiteten er sekundær porøsitet dannet som følge av oppløsning av både detriale og autigene faser av hovedsaklig albitt, men også kvarts og kalifeltspat. Det er observert en liten mengde autigen kalifeltspat i denne typen bergart, og det antas at dette har en ubetydelig innvirkning på porøsiteten.

De kremgule sandsteinene fra nærområdet som grenser til Witkop I har mye større porøsitet enn slambergartene, hovedsaklig på grunn av mangel på kalsittsement. Den autigene veksten av både kvarts og albitt er større sammenliknet med slambergartene, og det er forholdsvis hyppigere vekst av euhedrale krystaller av begge de to fasene. Autigen kvarts og albitt virker begge stedvis som porefyllende materialer. Porerommene er også fylt av leirmineraler som illitt og kloritt og biotitt. Disse kremgule sandsteinene er noe forvitret og en del av porøsiteten er av sekundær opprinnelse

hovedsaklig som følge av oppløsning autigene og detriale faser av albitt, dog også noe oppløsning av detriale og autigene faser av kalifeltspat og kvarts.

Ventsandsteinene fra Witkop I har den største porøsiteten i forhold til de andre sandsteinene i dette studiet. Det er flere autigene faser som virker porefyllende og porereduserende, spesielt kvarts og albitt. Autigen kalifeltspat virker også stedvis porefyllende, dog veksten av autigen kalifeltspat er relativt liten i forhold til veksten av kvarts og albitt. Sekundær porøsitet er dannet som følge av oppløsning av pertittlameller i kalifeltspatkorn, og av annen albitt som både detriale albittkorn og porefyllende autigen albitt. Sekundær porøsitet er også dannet som følge av oppløsning av detriale kalifeltspatkorn. Autigen kalifeltspat danner stedvis et belegg rundt detriale kalifeltspatkorn som siden er blitt oppløst, slik at belegget utgjør poreveggen. Det er observert resterende detriale kalifeltspatkorn som er plassert midt i poren med en porevegg bestående av kalifeltspat. Både detrial og autigen kvarts er relativt godt bevart. Porerommene er fylt med leirmineraler som illitt og kloritt og biotitt, dog er dette ikke gjennomgående i hele prøven.

Ventsandsteiner fra Modena I og II har noe mindre porøsitet enn sandsteinene fra Witkop I, til tross for meget lik tekstur og autigene faser. Også disse prøvene har fått sekundær porøsitet som følge av oppløsning av detriale kalifeltspatkorn, og stedvis ligger kun det autigene kalifeltspatbelegget igjen som en porevegg. Det er forholdsvis lite porereduserende kalifeltspat sammenliknet med autigen kvarts og albitt. De autigene og detriale fasene av albitt og kvarts er bedre bevart i sandsteinene fra Modena I og II enn sandsteinene fra Witkop I. De detriale korna som er delvis oppløst er forbeholdte bergartsfragmenter bestående av kvarts og kalifeltspat. Det er observert autigene flak av muskovitt i sandsteinene fra Modena I og II, men denne autigene mengden er så liten at det antas ikke å ha noe særlig innvirkning på porøsiteten.

5.12 Litologisammenlikning

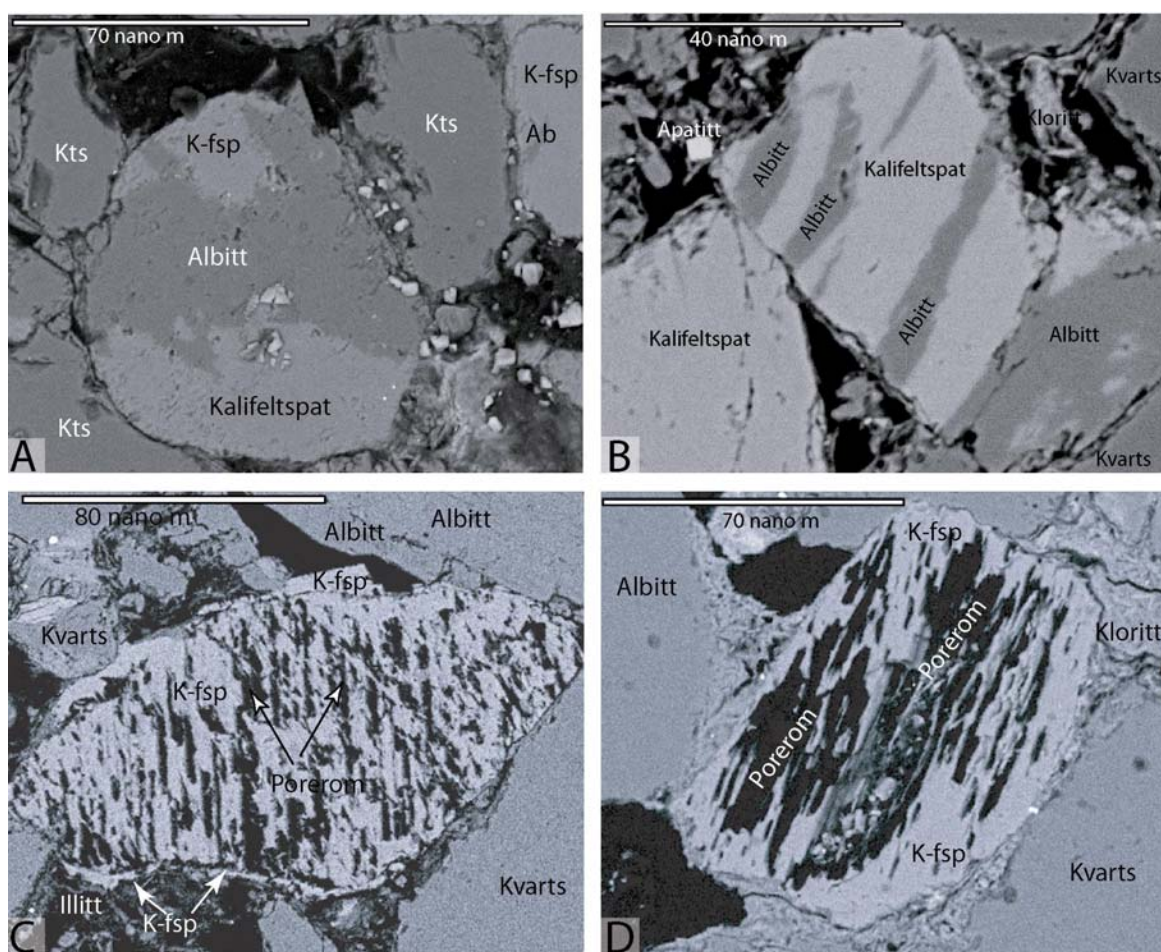
Tabell 5.1 er en oversikt over de ulike petrografiske egenskapene til de ulike litologiene som er beskrevet i dette kapitlet. Tabellen er laget ved å anslå prosentvis mengde på øyemål fra SEM-bilder, ved å bruke visuelle estimeringsdiagrammer etter Terry og Chilingar (1955).

Ved å sammenlikne resultatene fra de tre litologytypene ser man at kalsittsement er den mest porereduserende autigene fasen. Den røde slambergarten er den litologien med lavest porøsitet og den eneste med kalsittsement. Denne litologien inneholder liten mengde autigene leirmineraler som virker porereduserende. De kremgule sandsteinene fra området i nærheten av Witkop I er den litologien som har intermedier mengde porøsitet sammenliknet med de

røde slambergartene og ventsandsteinene. Ved å sammenlikne denne litologien med litologien fra ventkomplekset, ser man at hovedforskjellene mellom disse er at de kremgule sandsteinene inneholder mer matriks og mer porefyllende leirmineraler enn ventsandsteinene. Derimot har ventsandsteinene mer av de autigene fasene kvarts og albitt. Det er særskilt forskjellene i mengden av autigen albitt som er størst. (Forskjellene i mengden av den autigene kalifeltspaten er såpass liten at den kan ignoreres). Ettersom både autigen kvarts og albitt forekommer som både påvekster og sement, skulle man tro at de medvirket som porereduserende materialer. Selv om ventsandsteinene inneholder betydelig større mengde av autigen albitt har de likevel større porøsitet enn de omliggende kremgule sandsteinene. Hvis man ser på forskjellene i primær og sekundær porøsitet mellom de kremgule sandsteinene som omringer ventkomplekset og ventsandsteinene, ser man at andelen sekundær porøsitet er større i den bergarten med størst porøsitet, nemlig i ventsandsteinene. Ved å sammenlikne forskjellene i sekundær porøsitet ser man at ventsandsteinene har betydelig større mengde sekundær porøsitet grunnet oppløsning av pertittlameller i forhold til de kremgule sandsteinene (se også figur 5.13). I tillegg har oppløsningen av kalifeltspat vært mye større i de kremgule sandsteinene som omringer Witkop I. Videre ser man at disse kremgule sandsteinene har gjennomgått en større andel oppløsning av albitt i forhold til ventsandsteinene, dette til tross for at mengden av albittkorn omtrent er det samme i begge litologiene. Årsakene til dette diskuteres i kapittel 8.3.

Tabell 5.1:	Kremgul sandstein	Rød slambergart	Ventsandstein
100 % Prøve			
Korn:	73 %	55 %	72 %
Matriks:	12 %	2 %	3 %
Autigene mineraler:	7 %	38 %	11 %
Porerom:	8 %	5 %	14 %
100 % Korn			
Kvarts:	50 %	65 %	45 %
Albitt:	35 %	30 %	40 %
Plagioklas:	4 %	1 %	3 %
Kalifeltspat:	8 %	3 %	12 %
Glimmer:	3 %	1 %	
100 % Autigene mineraler/sement			
Kvarts:	30 %	4 %	36 %
Albitt:	28 %	15 %	57 %
Kalifeltspat:	8 %	1 %	3 %
Kalsitt sement:		79 %	
Leirmineraler:	34 %	1 %	4 %
100 % Porerom			
Primær porøsitet:	70 %	1 %	60 %
Sekundær porøsitet:	30 %	99 %	40 %
100 % Sekundær porøsitet/forvitring			
Pga. oppløsning av pertittlameller:	1 %		20 %
Pga. oppløsning av albitt:	77 %	80 %	15 %
Pga. oppløsning av kvarts:	12 %	15 %	3 %
Pga. oppløsning av kalifeltspat:	10 %	5 %	62 %

Figur 5.13 er en figur av petrografen til de kremgule sandsteinene fra omliggende sedimenter og ventsandsteinene fra Witkop I. Hovedforskjellen er at ventsandsteinene har mer sekundær porøsitet pga. oppløsning av pertittlameller i kalifeltspaten. Sandsteinene fra omliggende strata har også kalifeltspat som inneholder albitt, men her ligger albitten mer i soner enn i lameller, og albitten er mer intakt. Oppløsningen av pertittlamellene i ventsandsteinene på et tidlig diagenesestadium kan ha forårsaket mer utfelling av albitt på et senere stadium. Men ettersom prøvene er kraftig forvitrede, er det vanskelig å si hvorvidt oppløsningen av pertittlamellene skjedde på et tidlig-diagenetisk stadium eller om det er som følge av forvitringen etter begravelsesdiagenesen.



Figur 5.13: BSE-bilder som viser forskjellen mellom de kremgule sandsteinene som omringer Witkop I (A, B og C) og ventsandsteinene (D og E). **A:** BSE-bilde av prøve KO1S-3 fra logg 1. Albitten i kalifeltspaten opptrer mer i soner enn i pertittlameller. **B:** BSE-bilde fra prøve KO1S-3 fra logg 1. Formen på albitten i kalifeltspaten er tilnærmet lik pertittlameller, og er fremdeles intakte. **C:** BSE-bilde fra ventsandstein og prøve KO1S-51. Kalifeltspatkornet inneholder sekundærepørøsitet med morfologi som likner pertittlameller. I tillegg vises det hvorledes autigen kalifeltspat har vokst som et belegg rundt det detriale kalifeltspatkornet. Den autigene kalifeltspaten predaterer oppløsningen av pertittlamellene, ettersom den ikke fyller den sekundære porøsiteten forårsaket pertittoppløsningen. **D:** BSE-bilde fra ventstandstein og prøve KO1S-30. Kalifeltspatkornet inneholder sekundær porøsitet med morfologi som likner partittlameller.

5.13 Oppsummering

De autigene fasene som er observert i prøvene fra ventkomplekset og fra omgivende bergarter er for det meste albitt, kvarts, kalifeltspat, kalsitt og barytt. Petrografisk skiller sandsteinen i ventkomplekset Witkop I seg ut med disse særegne karakteristikkene:

- Sandsteinene fra ventkomplekser inneholder kalifeltspatkorn med pertittlameller som oftest er oppløste, mens omgivende sandsteiner inneholder kalifeltspatkorn med soner av albitt, som fremdeles er intakte. Dette gir sandsteinene fra ventkomplekset større sekundær porøsitet i forhold til sandsteinene fra det tilgrensende området. I tillegg har ventsandsteinen mer albittsement enn de andre litologiene.
- Nålfornet autigen kalsitt er kun observert i ventkomplekset. Riktignok er dette fenomenet bare funnet i én prøve, KO3HS-29.
- Fragmenter bestående av sandstein som likner på Clarens formasjonen er kun observert i en brekksje-tverrgang som kutter i ventsandsteinen. Fragment som nesten bare består av albitt er også særegen for denne litologien. Det er ikke observert brekksje-tverrganger i andre litologier enn i ventsandsteinen fra Witkop I.
- Det er ikke observert hydrotermale mineraler som f.eks. laumontitt i noen av prøvene.

KAPITTEL 6 ELASTISKE EGENSKAPER

6.0 Elastiske egenskaper

Totalt fire prøver fra Witkop I-området ble analysert for P-bølge- og S-bølgehastigheter og tetthets- og porositetmålinger ved Norges Geotekniske Institutt (NGI), Oslo, Norge, med hensikt på å identifisere de petrofysiske egenskapene til sandsteinene. To av prøvene er fra selve ventkomplekset (KOIS-31 og KOIS-51) og består av kremgul sandstein, mens de andre to prøvene er fra bakgrunnsedimentene i Witkop I-området; KOIS-37 er rød slambergart innsamlet ca. 50 m fra ventkomplekset, og KOIS-3 er kremgul sandstein innsamlet ca. 380 m fra ventkomplekset. Nærmere petrografisk beskrivelse av disse prøvene, se appendiks 10.12-10.16. I tillegg er det vurdert en annen sandsteinsprøve hentet fra et mye lavere stratigrafisk nivå (Nedre Beaufort gruppe) i Karoo-bassenget, C36, der dataene fra denne prøven er hentet fra Camilla Haaves hovedoppgave. Beskrivelse av C36 (Camilla Haave, pers. komm.): Det er en sandstein som består av ca. 60% kvartskorn, 20 % albittkorn, og de resterende prosentene består av leire og andre mineraler. Kornene er kantete og kornkontakten er lange og konkave, noe som indikerer deformasjon pga. begravning. Det meste av porositeten er sekundær som følge av oppløsning av feltspatkorn. Bergarten har liten permeabilitet og er meget tett. Autigene mineraler er kvarts og albitt. Metodene som er benyttet er forklart i kapittel 3.

6.1 Resultater

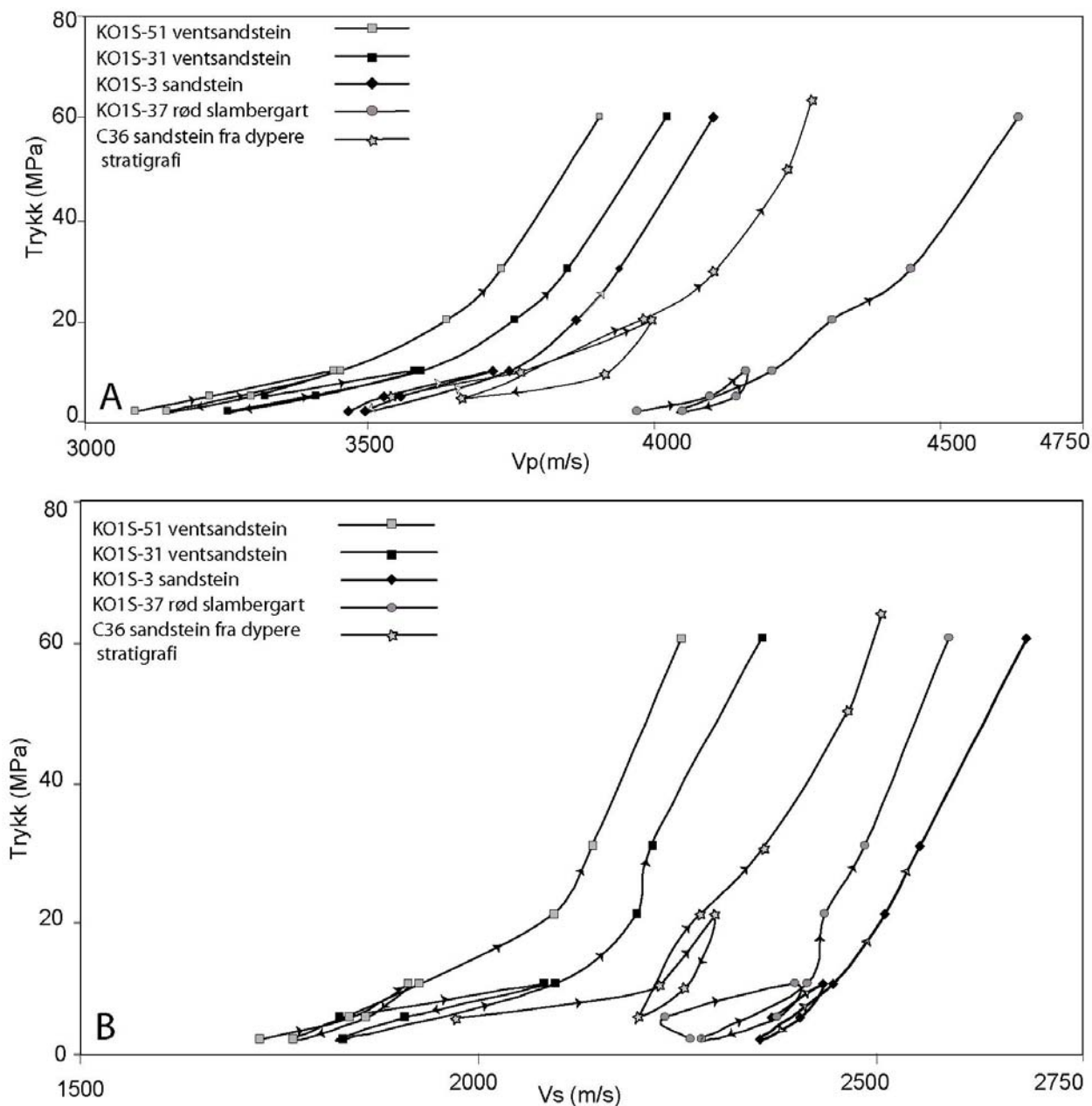
Tabell 6.1 viser resultatene fra hastighetsanalysene og tabell 6.2 viser analyseresultatene fra bulk tetthet, korntetthet og porositet, med data fra NGI (metoder se kapittel 3.6).

Tabell 6.1: Seismiske hastigheter (P- og S-bølger) ved ulike trykk:

Prøve	KOIS-37	KOIS-37	KOIS-37	KOIS-31	KOIS-31	KOIS-31	KOIS-51	KOIS-51	KOIS-51	KOIS-3	KOIS-3	KOIS-3	C36	C36	C36
Vertikal trykk	P-bølge (m/s)	S-bølge (m/s)	Vp/Vs	P-bølge (m/s)	S-bølge (m/s)	Vp/Vs	P-bølge (m/s)	S-bølge (m/s)	Vp/Vs	P-bølge (m/s)	S-bølge (m/s)	Vp/Vs	P-bølge (m/s)	S-bølge (m/s)	Vp/Vs
2 MPa	3970	2265	1,75	-	-	-	3092	1725	1,79	3465	-	-	-	-	-
5 MPa	4096	2233	1,83	3318	1825	1,81	3223	1837	1,75	3528	2367	1,49	3507	1988	1,76
10 MPa	4159	2396	1,74	3580	2081	1,72	3441	1913	1,8	3718	2432	1,53	3756	2239	1,68
20 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3997	2310	1,73
10 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3913	2269	1,72
5 MPa	4142	2373	1,75	3408	1905	1,79	3296	1858	1,78	3557	2403	1,49	3705	2204	1,68
2 MPa	4041	2279?	1,77?	3255	1827	1,78	3148	1766	1,78	3502	2352	1,49	-	-	-
10 MPa	4205	2411	1,74	3592	2094	1,72	3450	1925	1,79	3746	2445	1,53	-	-	-
20 MPa	4310	2434	1,77	3755	2197	1,71	3637	2091	1,74	3864	2509	1,54	3983	2304	1,73
30 MPa	4447	2484	1,79	3848	2215	1,74	3733	2142	1,74	3938	2554	1,54	4098	2366	1,73
50 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4231	2466	1,72
60 MPa	4635	2590	1,79	4021	2355	1,71	3904	2253	1,73	4103	2688	1,53	-	-	-
64 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4272	2503	1,71

Tabell 6.2: Analyseresultater på bulk tetthet, korn tetthet og porøsitet, med data fra NGI:

Prøve- navn	Startvekt tørr prøve (g)	Etter koking, våt vekt (g)	Vekt av fortrengt vann (g)	Volum, temp. korr. (cm ³)(23,4C)	Tørrvekt 105C, 4 døgn (g)	Tørrvekt 105C, 11 døgn (g)	Vekt porevann (g)	Vann- innhold etter koking (%)	Densitet tørr (g/cm ³)	Tyngde- tetthet tørr (kN/m ³)	Korn- densitet (g/cm ³)	Tyngde- tetthet av korn (kN/m ³)	Porøsitet (%)
C36	205,91	215,86	87,30	87,53	204,31	204,44	11,42	5,59	2,34	22,9	2,69	26,4	13,08
KO1S- 3	413,7	436,5	181,65	182,12	412,27	412,46	24,04	5,83	2,26	22,2	2,61	25,6	13,23
KO1S- 31	280,7	298,33	126,26	126,59	279,65	279,77	18,56	6,63	2,21	21,7	2,59	25,4	14,70
KO1S- 51	281,96	298,82	126,65	126,98	280,04	280,24	18,58	6,63	2,21	21,7	2,59	25,4	14,67
KO1S- 37	328,64	334,97	129,50	129,84	327,29	327,4	7,57	2,31	2,52	24,7	2,68	26,3	5,85



Figur 6.1: *A:* Hysteresis-loop-kurver etter variasjoner i trykk versus P-bølge hastighet. *B:* Hysteresis-loop-kurver etter variasjoner i trykk versus S-bølge hastighet.

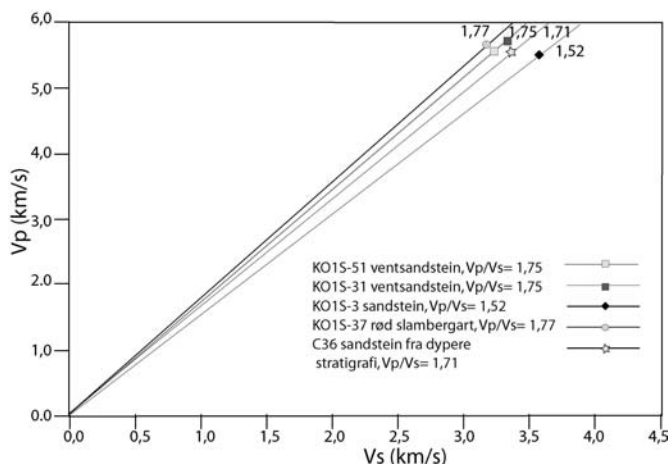
Fra tabell 6.1 sees det at de seismiske hastighetene for både S- og P-bølgene er betraktelig lavere ved alle trykk i de kremgule sandsteinene fra ventkomplekset i forhold til den røde slambergarten som er innhentet ca. 50 m fra ventkomplekset og den kremgule sandsteinen innhentet ca. 380 m fra ventkomplekset. Hysterese-loop- kurver for både P- og S-bølgene er plottet mot trykk i figur 6.1. Den røde slambergarten (KO1S-37) har mye høyere P-bølgehastighet enn de andre prøvene. Derimot er S-bølgehastigheten for denne prøven noe lavere enn S-bølgehastigheten for den kremgule sandsteinen innhentet ca. 380 m fra ventkomplekset (KO1S-3), dog, fremdeles er S-bølgehastigheten for KO1S-37 høyere enn for prøvene fra ventkomplekset. C36 har større P-bølgehastighet enn de andre sandsteinene, mens S-bølgehastigheten kun er høyere enn ventsandsteinene. Igjen har KO1S-3 sandsteinen høyere S-bølge hastighet i forhold til de andre sandsteinene.

De elastiske egenskapene til prøvene kan testes ved å øke trykket inntil ytepunktet til litologien er nådd (figur 6.1). Ved å senke trykket igjen tar det noe tid før bergarten gjenopptar sitt ordinære volum, noe som resulterer i en løkkeformet graf (hysterese loop-kurve). Hvis man så øker trykket igjen kan man teste om hastigheten er høyere eller lavere eller det samme, det vil si om bergarten er blitt tettere eller har sprukket opp eller om litologien forble uforandret etter avlastningen.

Fra P-bølge hastighetene i figur 6.1 A, ser man at alle prøven etter avlastningen fikk en høyere hastighet den andre gangen de ble utsatt for høyere trykk, bortsett fra Camilla Haaves prøve, C36. Sandsteinen C36, fikk først en minking i hastigheten ved lavt trykk, for deretter å få en økning i hastigheten ved større trykk. Dette indikerer at denne litologien er noe mer rigid enn de andre litologiene og at den kanskje er utsatt for oppsprekning ("strain softening"). De andre prøvene er noe plastisk deformert (en permanent forandret, "strain hardening") etter den første gangen de ble utsatt for trykk, det vil si at litologien ble trykket sammen og fikk en større tetthet, noe som igjen gir større hastighet. Den røde slambergarten fikk den største økningen i hastigheten, noe som indikerer at denne litologien ble mest deformert plastisk.

Figur 6.1 B er en framstilling av S-bølge hastigheten versus trykk. Det er generelt økning i S-bølge hastigheten under den andre gangen av trykkforhøyelse. Alle prøvene bortsett fra C36 hadde en økning i hastigheten. Minkingen i S-bølge hastigheten i C36 kan være som følge av oppsprekning.

V_p/V_s er en litologi-indikator og i tabell 6.3 er en oversikt over V_p/V_s -verdiene til de fem prøven som nevnes her. Figur 6.2 viser en graf med de målte verdiene.



Figur 6.2: V_p/V_s -verdier for de ulike prøvene.

Tabell 6.3: V_p/V_s -verdier

Prøve	Litologi	V_p/V_s -verdi
KO1S-31	Ventsandstein	1,75
KO1S-51	Ventsandstein	1,75
KO1S-3	Sandstein	1,52
KO1S-37	Rød slambergart	1,77
C36	Sandstein	1,71

V_p/V_s -verdiene for ventsandsteinene ligger rundt 1.75 som er normalt for porøse sandsteiner. En V_p/V_s -verdi på 1.52 skulle normalt tilsvare mer sementerte sandsteiner, jmf. kapittel 3.6.

6.2 Oppsummering

Hystereseloop-kurvene viser at den røde slambergarten, KO1S-37, fikk den største økningen i P-bølgehastighet. Dette indikerer at bergarten ble tettere som følge av plastisk deformasjon. Sandsteinsprøven, KO1S-3, fikk også en større økning i P-bølgehastighet enn ventsandsteinene, noe som indikerer at denne prøven er mindre rigid og er mer plastisk deformert enn ventsandsteinene. C36 viser derimot en annen trend. Den minker i P-bølgehastighet, noe som tyder på at bergarten har fått en minking i tetthet. Dette indikerer oppsprekning av bergarten under hastighetsanalysen.

Forskjellene i S-bølgehastigheter etter avlastningen er mindre enn forskjellene i P-bølgehastighetene. Dog, det vises at slambergarten, KO1S-37, har litt større økning i S-bølgehastighet enn de andre prøvene. C36 har hatt en minking i S-bølge hastighet.

KAPITTEL 7 STABILE LETTE ISOTOP-ANALYSER**7.0 Bakgrunn**

Noen av de innsamlede prøvene fra Witkop I feltområdet inneholder kalsittsement. Prøvene ble sendt til Institutt for energiteknologi (IFE), Norge, for analyser av karbon- og oksygenisotoper for å bestemme kilden for karbonet og muligens også dannelsestemperaturen. Videre kan isotopdataene si noe om hvorvidt det hydrotermale ventkomplekset har fungert som en sekundær migrasjonsvei for hydrokarboner.

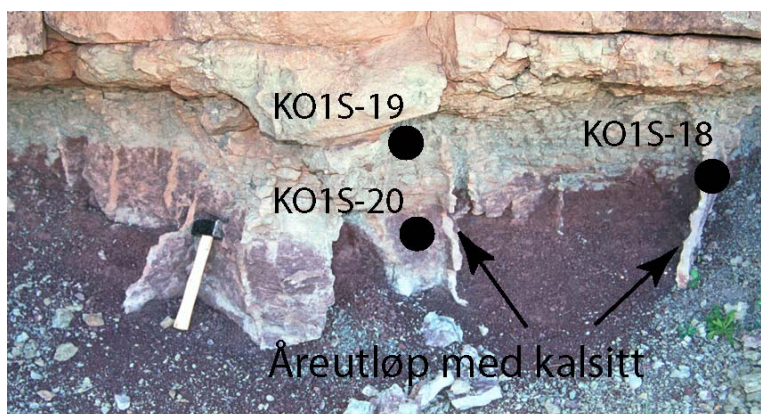
7.1 Prøver

- Tabell 7.1 er en oversikt over prøvene som analysene ble utført på, samt analyseresultatene fra IFE.
- Prøvene KO1S-40 (figur 7.2 C) og KO1S-41 er fra kalsittsementerte sedimentære piper i ventkomplekset. De inneholder også klaster bestående av kalsitt. CL-studier viser nyanser i den lumineserte rødfargen i klasten som tyder på minst to trinn med kalsittutfelling. Kalsittsementen i klastene er mikrittiske. Stedvis fins det også tilfeldig fordelt kalsitt ("patchy calcite") som også er mikrittisk.
- Prøve KO1S-18A (figur 7.1, 7.2 A) er et kalsittsementert åreutløp. Den kommer fra en sone der rød siltstein blir gråere/grønnaktig oppover i stratigrafien og som på toppen grenser til en kremgul sandsteinsenhet. I tynnslip ser dette ut som enn kalsittsementert sandstein. Kalsittsementen er mikrittisk, og fargenyansene fra CL-studier viser minst to trinn med utfelling. Kalsittsementen er gjennomgående i hele prøven. Ut ifra feltobservasjonene (kapittel 4.5), antas denne sonen, der prøvene KO1S-18 A, KO1S-19 og KO1S-20 er hentet fra, å presentere et jordprofil (figur 7.1).
- KO1S-19 er samlet fra samme siltsteinslag som KO1S-18A, helt øverst på grensen mot den kremgule sandsteinsenheten. Kalsittsementen er mikrittisk og tilfeldig fordelt ("patchy"). KO1S-21 kommer fra samme siltsteinsenhet som KO1S-18 og -19, dog et par meter lavere i stratigrafien. Kalsittsementen er gjennomgående i hele prøven og er både mikrittisk og sparittisk (figur 7.2 B). Poikilotopisk kalsitt er også observert. Også i denne prøven er det observert fargenyanser ved CL-studier som indikerer minst to trinn med utfellinger.
- Prøvene KO1S-10-23 og -24 kommer fra kremgule sandsteinsenheter. Kalsittsementen i disse prøvene er tilfeldig fordelt og mikrittisk.

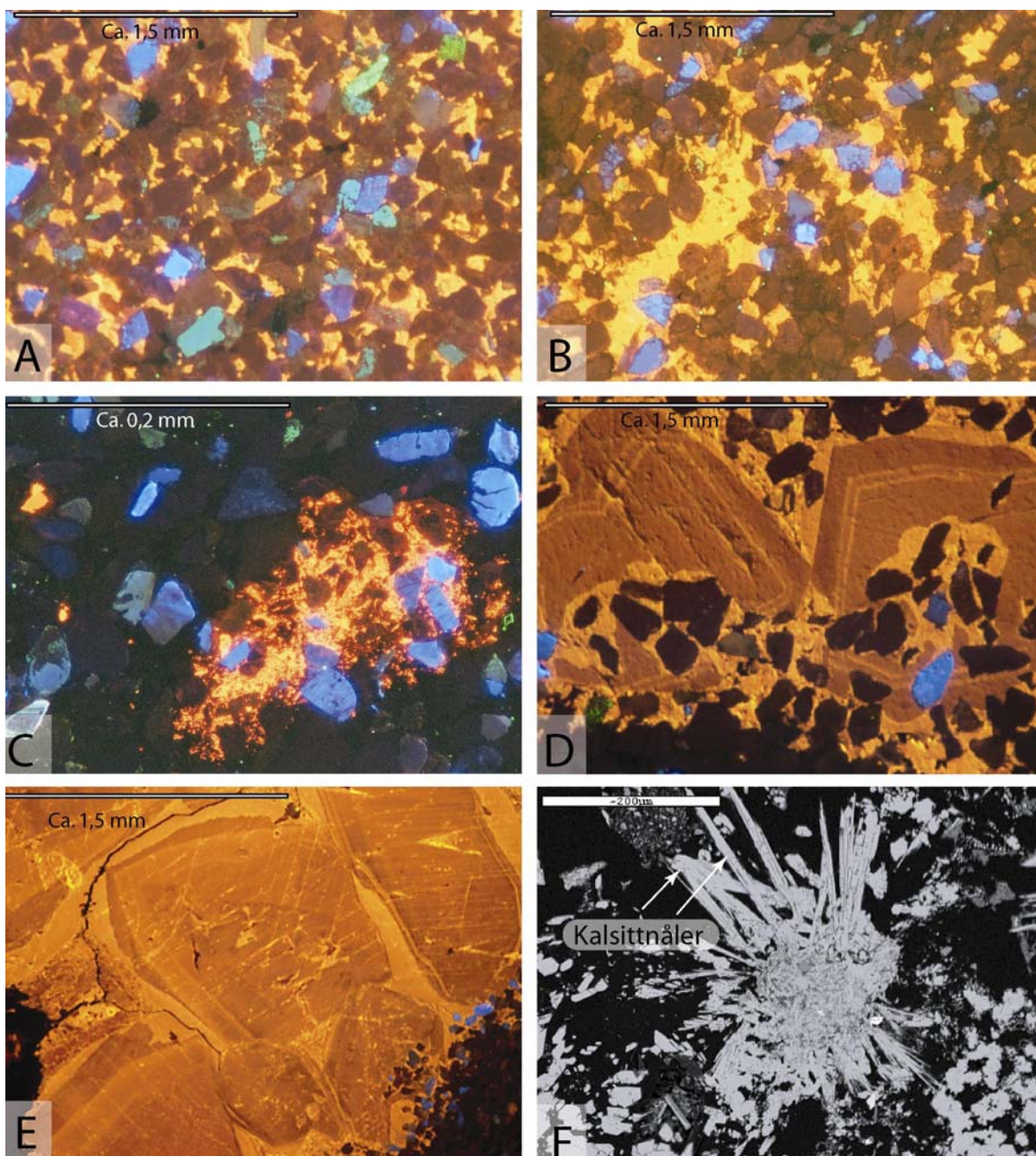
- KO1S-2 er en prøve fra en kremgul sandsteinsenheter, og det er fra en kalsittåre (figur 7.2 D og E). Kalsitten i denne åren har godt utviklede krystaller som ligger oppå hverandre, og mange av dem har perfekte romboedriske kløv. CL-studier viser flere fargenyanser fra luminesensen som tilsier flere uttallige episoder med utfelling/vekst av kalsitt. Litt kalsitt er også observert i den kremgulesandsteinen som gjester denne kalsittåren. Her observeres det vekst av kalsittkrystaller i en poikilotopisk sement som omslutter originale sandsteinskorn.
- Prøve KO1S-42 er innhentet fra en linse med breksjert og grovere materiale, og denne litologien er plassert inni ventsandsteinene som fyller Witkop I. Den inneholder tilfeldig fordelt mikrittisk kalsittsement.
- Prøve KO3HS-29 er hentet fra samme litologi som prøve KO1S-42, dog fra en sone som er lite kohesiv. Denne prøven viser en helt annen type autigen kalsitt enn noen av de andre prøvene. Den har en nålformet autigen kalsitt som har vokst ut i porerom (figur 7.2 F). Denne prøven lumineserer ikke i CL-mikroskopet, muligens pga. innhold av "kvelere" ("quencher") som for eksempel jern. Fra appendiks 10.10 ser man at prøven inneholder strontium.

Den utfelte kalsitten er av sendiagenetisk opprinnelse i alle prøvene, og er sannsynligvis felt ut under teleogenesen. Det er ikke observert andre autigene faser enn kalsitt i prøven KO1S-29, slik at tidspunktet for veksten av den autigene kalsitten ikke kan bestemmes.

Figur 7.1 viser et feltbilde over et jordprofil. Under anoksiske forhold blir jernet redusert, slik at bergartens farge endres fra rød (nederst) mot grønn-aktig farge (øverst). Hvis nedbøren er mindre enn fordampning og avrenning, er nettotransporten av porefluidet oppover, og det felles ut karbonat eller caliche. Flere kalsittsementerte åreutløp er observert å begynne og slutte lokalt.



Figur 7.1: Oversikt over sonen der prøvene KO1S-18-19 og -20 er innhentet fra. Det er et jordsmonnprofil.



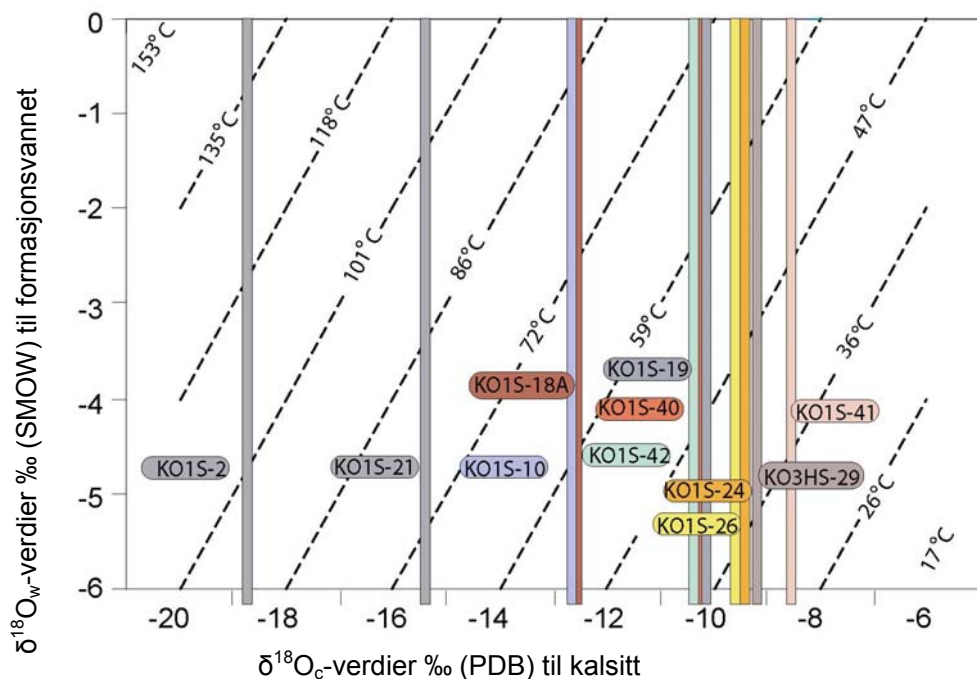
Figur 7.2: Bilder av prøver med kalsitt. **A:** CL-bilde av prøve KO1S-18A som viser fargenyansen i den mikrittiske sementen. **B:** CL-bilde av KO1S-21 som viser fargenyanser i sementen. **C:** CL-bilde av prøve KO1S-40 som viser en klast med mikrittisk sement. **D:** CL-bilde av KO1S-2 som viser hvordan kalsittkrystaller har vokst fra poikilotropisk kalsitt som omslutter detriale sandkorn. **E:** CL-bilde av KO1S-2 som er en kalsittåre. Bilde viser hvordan kalsittkrystaller har vokst på hverandre, og fargenyansene viser flere trinn med påvekst og utfelling av kalsitt. **F:** BSE-bilde (SEM) av prøven KO3HS-29, som viser nålfomet autigen kalsitt. Denne prøven lumineserer ikke under CL-mikroskopet. Det er ikke observert kontrast i lyshetsgrad i kalsittnålene, slik at kalsittutfellingen trolig ble felt ut fra samme type fluid.

7.2 Resultater

Tabell 7.1 oppsummerer analyseresultatene fra IFE.

Tabell 7.1: Analyseresultater

Prøve	Bergart	Formasjon	Lokalitet	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (PDB)	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (PDB)
KOIS-40	Kalsittementert sandstein	Pipe i hydr.vent	Witkop I	-6,83	-10,24
KOIS-41	Kalsittementert sandstein	Pipe i hydr.vent	Witkop I	-7,67	-8,78
KOIS-18A	Åreutløp i rød sandstein	Elliot/Clarens- overgangen	Logg 3	-8,67	-12,64
KOIS-10	Kalsittementert sandstein	Elliot/Clarens- overgangen	Logg 2	-8,19	-12,69
KOIS-19	Kalsittementert sandstein	Elliot/Clarens- overgangen	Logg 3	-6,43	-10,22
KOIS-21	Kalsittementert sandstein	Elliot/Clarens- overgangen	Logg 3	-9,56	-15,36
KOIS-26	Kalsittementert sandstein	Elliot/Clarens- overgangen	Logg 3	-9,02	-9,78
KOIS-24	Kalsittementert sandstein	Elliot/Clarens- overgangen	Logg 3	-7,19	-9,38
KOIS-2	Kalsittåreutløp i sandstein	Elliot/Clarens- overgangen	Logg 1	-12,92	-18,88
KOIS-42	"Linse med breksjert materiale", kohesiv.	Ventsandstein	Witkop I	-7,3	-10,3
KO3HS-29	"Linse med breksjert materiale", ikke kohesiv.	Ventsandstein	Witkop I	-6,3	-9,1



Figur 7.3: Et diagram som viser ulike temperaturrekter for utfelling av kalsitt i de ulike prøvene (Basert på likning 3.10 og antakelse av $\delta^{18}\text{O}_w$ -verdien til mellom 0 og -6 ‰ SMOW (Alley og Cuffey, 2001, samt analyseresultatet fra IFE).

Figur 7.3 er et diagram som viser hvilke temperaturrekker prøvene er felt ut under. Temperaturene er regnet ut ved bruk av likning 3.10 (Epstein et al., 1953), og ved å anta $\delta^{18}\text{O}_w$ -verdien til mellom 0 og -6 ‰ SMOW (Alley og Cuffey, 2001).

Likning 3.10:

$$T^{\circ}\text{C} = 16,9 - 4,21(\delta_c - \delta_w) + 0,13(\delta_c - \delta_w)^2$$

, der $\delta_c = \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}(\text{kalsitt})$
og $\delta_w = \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{formasjonsvannet})$

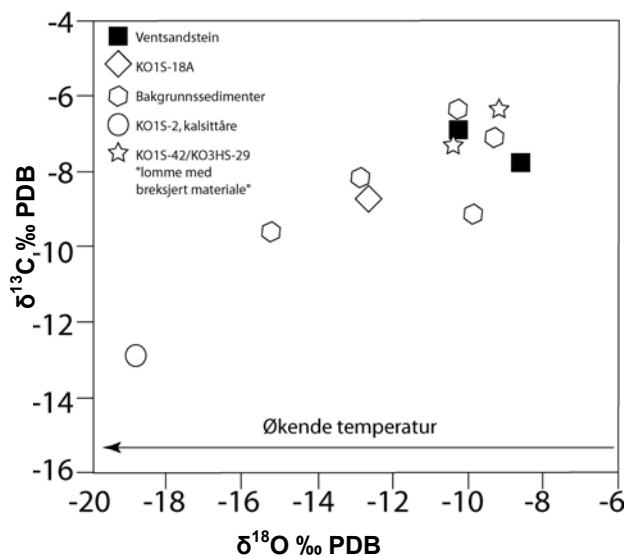
$\delta^{18}\text{O}_w$ -verdien avhenger hvorvidt det snakkes om et marint- eller ferskvannsmiljø og hvilke breddegrader formasjonsvannet fant sted. Dette er en usikker faktor, og verdiene i figur 7.3 bør betraktes relativt til hverandre.

Ut ifra figur 7.3 er det klart at spesielt én prøve skiller seg ut fra de øvrige, og det er prøven KO1S-2, som er en kalsittåre hentet fra logg 1. Denne prøven har en mye høyere utfellingstemperatur enn de andre prøvene. Prøvene fra ventsandsteinene (som representerer kalsittsementerte pipestrukturer) plottes i området rundt de andre bakgrunnsprøvene. KO1S-42 og KO3HS-29 kommer fra det som er kalt en linse med grovere materiale innenfor ventkomplekset, en litologi som skiller seg meget ut i forhold til ventfyllet. På plottet i figur 7.4 skiller disse prøvene

seg derimot ikke noe særlig ut i forhold til de andre prøvene. Prøven KO1S-21, som er den bakgrunnsprøven som plottes nest nederst til venstre i figur 7.4, er innhentet fra et lavere stratigrafisk nivå enn de andre prøvene.

7.3 Sammenlikning med annen data

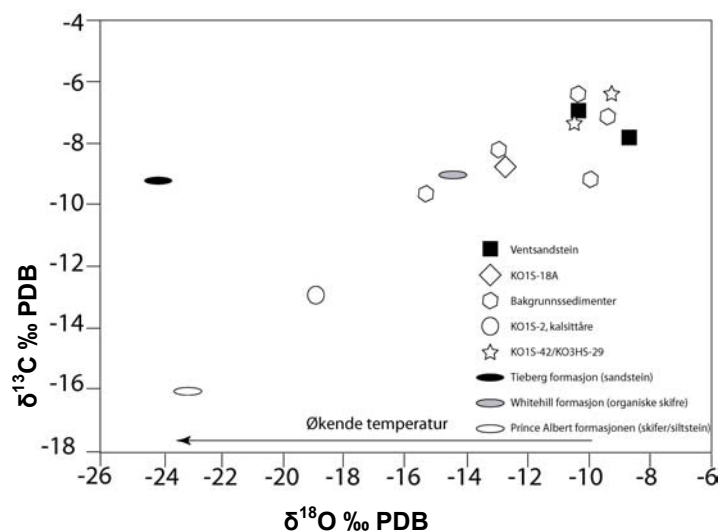
Faure og Cole (1999) har studert stabile lette isotop-data fra prøver hentet fra Karoo-bassenget. Verdiene fra disse prøvene er vist i tabell 7.2. Disse verdiene er sammen med de målte verdiene fra Witkop I-området plottet i figur 7.5.



Figur 7.4: Et plott av $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ stabile lette isotop-data av kalsitt fra Witkop I-området. Alle verdiene er målt i PDB.

Formasjon	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}\text{‰}$ (PDB)	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\text{‰}$ (PDB)
Tierberg fm.	-9,3	-24,1
Whitehill fm.	-9,0	-14,1
Prince Albert fm.	-16,0	-23,1

Tabell 7.2: Stabile lette isotop-data fra Karoo-bassenget, hentet fra Faure og Cole, 1999.



Figur 7.5: Sammenlikning av stabile lette isotop-data hentet fra Faure og Cole, 1999, med de nye dataene fra Witkop I.

Tierberg formasjonen (sen perm) består av sandstein som inneholder kalkrike skiferlag. Whitehill formasjonen (slutten av tidlig perm) består av organiske skifre som inneholder diskrete kalsitt- og dolomittlag. Prince Albert formasjonen (tidlig perm) består av skifre og siltbergarter med kalkrike skiferlag.

Fra plottet i figur 7.5 og tabell 7.2 ser man at isotop-verdiene fra Prince Albert formasjonen har en større utarming av ^{13}C og ^{18}O i forhold til de andre målte verdiene. Kalsitten som er felt ut i denne formasjonen er dannet ved høyere temperaturer i forhold til de andre prøvene. Prince Albert formasjonen er også på det laveste stratigrafiske nivået. Isotop-verdiene fra Whitehill formasjonen har meget like verdier som bakgrunnsprøvene fra Witkop I-området, mens isotop-verdiene fra Tierberg formasjonen har en meget større utarming på ^{18}O i forhold til Witkop I-prøvene. Kilden til fluidet som felte ut kalsitten i Witkop I-området, som er på et høyere stratigrafisk nivå, er derfor ikke fra Prince Albert- eller Tierberg formasjonene.

7.4 Oppsummering

- Prøvene fra det hydrotermale ventkomplekset Witkop I har lave utfellingstemperaturer som ligger mellom 30-74°C. Det antas derfor at kalsitten ikke er utfelt hydrotermalt.
- Kalsittnålene fra prøve KO3HS-29, har utfellingstemperaturer mellom 31-66°C. Denne kalsitten er heller ikke felt ut av en hydrotermal løsning.
- Kalsitten fra prøve KO1S-42, som er fra en linse med breksjert materiale, har utfellingstemperaturer mellom 37-74°C.

- Den kalsittsementerte sediment-pipe-liknende strukturen, der KO1S-40 og -41 kommer fra, viser også lave utfellingstemperaturer mellom 30-74°C.
- De eneste prøvene som muligens har kalistt utfelt fra høy-temperert fluid er KO1S-2, som er en kalsittåre fra logg 1 (93-143°C), og prøve KO1S-18A (51-91°C), som er hentet fra en kalsittåreutløp fra logg 3.
- $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene ligger mellom -6.3 ‰ PDB og -7.67 ‰ PDB for kalsitt som er felt ut i det hydrotermale ventkomplekset. Prøve KO3HS-29, som har nålformet autigen kalsitt, har en $\delta^{13}\text{C}$ -verdi på -6.3 ‰ PDB, noe som ikke skiller seg noe særlig ut i forhold til de andre prøvene.
- Generelt er $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene hentet fra Witkop I-området mellom -6,3-12,92 ‰ PDB, noe som viser en svak utarming av ^{13}C i forhold til ^{12}C . Det er kun kalsittåren fra prøve KO1S-2, som viser en annen signatur enn de andre prøvene. Kalsittåren har en verdi på -12,92‰ PDB, som viser en større utarming av ^{13}C i forhold til ^{12}C i forhold til de andre prøvene.
- $\delta^{13}\text{C}$ -signaturene for kalsitt fra ventkomplekse skiller seg ikke ut i forhold til bakgrunnsedimentene.
- Sammenlignet med isotop-data fra Faure og Cole (1999), ser man at egne data har en ulik isotop-signatur enn kalsitter fra underliggende sedimenter som Tierberg- og Prince Albert formasjonene. Kalsitter felt ut fra Whitehill formasjonen har derimot en isotop-signatur som er tilnærmet lik isotop-signaturen fra kalsitten som er felt ut i Witkop I-området.
- De fleste prøvene har fargenyanser i kalsittsementen under CL-mikroskop, noe som kan bety at porefluidet har endret sammensetningen og felt ut kalsitt med en annen fornyet isotopsammensetning.

KAPITTEL 8 DISKUSJON OG KONKLUSJON**8.0 Diskusjon**

Denne hovedoppgaven ble utført med hensikt på å karakterisere et hydrotermalt ventkompleks etter struktur, mineralogi, petrografi, seismiske hastighetsanalyser samt analyser av stabile lette isotoper. Videre skal disse karakteristikene si noe om ventdannelsen og hvorledes slike vertikale perturbasjoner kan påvirke et sedimentbasseng når det gjelder porøsitet, permeabilitet og fluidmigrasjon.

8.1 Feltobservasjoner og ventdannelse

Witkop I har disse karakteristikene:

- Den består av kremgul sandstein som er lik Clarens formasjonen. Denne sandsteinen inneholder sedimentære strukturer som kryssjikt og dyne, som sprekker har sprukket opp langs. Sprekkene/lagningene er ikke horisontale, noe sandsteinsenheter til sidebergarten er.
- Witkop I har en sidebergart bestående av vekslende enheter som er kremgul sandstein og rød slambergart fra Elliot formasjonen. Disse enhetene er horisontalt lagdelte. Både sidebergartene og ventkomplekset står ut som en positiv erosjonsstruktur i felten.
- En breksje-tverrgang, bestående av sandsteinsfragmenter opp til cm-størrelsesorden, kutter den kremgule sandsteinen som fyller ventkomplekset. Matriksen til tverrgangen likner på Clarens sand.
- Fra loggene ser man at den kremgule sandsteinsenheten som fyller Witkop I, ligger på et nivå som minst er 58 m lavere i stratigrafien i forhold til bergartene utenfor venten.

Witkop I er forskjellig fra andre hydrotermale ventkomplekser, som for eksempel Witkop II og Witkop III (se figur 4.1 B) (Svensen et al., foreligger), med at den ikke har en ytre sone bestående av lag som heller ned mot en indre sone; den er mindre preget av breksjemateriale og den mangler pipestrukturer som kutter sediment-breksjene. I tillegg er det ikke observert "slumping"(utglidnings)-strukturer i Witkop I, noe som er observert i Witkop III. I Witkop III er det i tillegg observert sediment-tverrganger i rikelige mengder i den indre sonen, men også i den ytre sonen. Dette er ikke observert i Witkop I. I Witkop II er det observert magmatisk materiale, noe som mangler i både Witkop I og III. (Data fra Witkop II og III er hentet fra Svensen et al., foreligger).

Det er beskrevet i både eldre og yngre litteratur (f. eks. Gevers, 1928; Svensen et al., foreligger) hvorledes omgivende sedimentære lag heller ned mot ventkomplekset på en vinkel opp mot 60°. Dette er tolket dithen at lag som bøyer ned mot ventkomplekset er et resultat av mekanisk påkjenning fra overliggende masser, som transporteres nedover i en diatrem som følge av masseunderskudd i undergrunnen. Omgrensende horisontale lag rundt Witkop I kan tyde på liten eller ingen mekanisk påkjenning av nedadgående masser. Materialet som fyller Witkop I, må enten ha blitt transportert nedover en distanse på ~58 m, eller ha blitt avsatt i et krater som minst var ~58 m dyp. Dette kan man si ettersom man må opp denne distansen i stratigrafien for å komme til en lagpakke som er like homogen.

Funn av sedimentære strukturer i ventfyllet indikerer at avsetningen har foregått in situ. En breksje-tverrgang som kutter ventfyllet, tilsier at sedimentasjonshastigheten har vært stor. For kratret må vært igjenfylt av sand mens bevegelser i undergrunnen skapte lokalt overtrykk og dannet breksje-tverrgangen. Andre observasjoner fra Witkop III, der en breksje er blandet og overdekket av Clarens sandstein, er også tegn på at sedimentasjonshastigheten har vært stor. Mangel på flyte- eller "slumping"(utglidnings)-strukturer kan tyde på at sandsteinene som fyller Witkop I ikke har vært fluidisert, noe som også støtter en forklaring på in situ avsetning.

De ovenstående feltobservasjonene kan si noe om prosessene som ligger bak dannelsen av det hydrotermale ventkomplekset Witkop I. Hydrotermale ventkomplekser som har en ytre sone bestående av lag som heller inn mot den indres sonen. De innoverhellende lagene er dannet som følge av kollaps av komplekset. Denne kollapsen er tolket å være et resultat av mangel på masse eller omarbeiding av materiale i undergrunnen (Gevers, 1928; Svensen et al, foreligger.). Ettersom sidebergarten til Witkop I er horisontalt lagdelt har det trolig vært ingen eller liten kollaps av komplekset. For å få dannet et dypt hull (~58 m) i bakken, samtidig som man antar liten eller ingen mekanisk påkjenning på sidebergarten som følge av nedadgående masser, er det sannsynlig å tro at en del materiale er blåst ut og avsatt på landoverflaten. For å skape en utblåsning av en slik karakter kreves det en kraftig eksplosjon.

Det hydrotermale ventkomplekset, Witkop I, er ikke observert å ha kontakt med magmatiske intrusiver. Svensen et al. (foreligger) har foreslått en dannelsesmodell for ventkompleksene i Karoo bassenget, basert på sammenlikning av ventkomplekser i Karoo fra felten og seismisk data fra Møre- og Vøring-bassengene offshore Norge. I den vestlige delen av Karoo-bassenget, der en lavere del av stratigrafien er eksponert i dagen (Ecca gruppen), er det dannet breksje-piper som er i

kontakt med metamorfe aureoler. Eccla gruppen inneholder flere skifre som er rike i organisk materiale (Whitehill formasjonen). Breksje-pipene representerer sannsynligvis røttene for de hydrotermale ventkompleksene som er eksponert i Stormberg gruppen på et høyere stratigrafisk nivå i den østlige delen av bassenget (Svensen et al., foreligger). Den foreslåtte dannelsesmodellen av Svensen et al. (foreligger) tar utgangspunkt i at hydrotermale ventkomplekser representerer en eller flere freatiske hendelser. De dannes i kontaktaureoler til de magmatiske intrusivene på grunn av oppvarming av porevann eller organisk materiale. Dette resulterer videre i rask oppbygning av poretrykk som fører til en utblåsning, som igjen skaper en breksjert gang mot overflaten. Dette betyr videre at hydrotermale ventkomplekser kan ha fungert som en kanal for gasser ut til atmosfæren.

Breksje-tverrgangen som er observert i Witkop I inneholder fragmenter av sandstein som likner på Clarens formasjonen. Matriksen består også av sandstein som likner Clarens formasjonen. Dette tyder på transport av masse fra et stratigrafisk nivå der Clarens formasjonen allerede var litifisert. Ettersom matriksen også består av Clarens sand, stammer dette materialet trolig fra den øverste delen av Clarens formasjonen som var ukonsolidert.

Mangel på funn av magmatiske fragmenter i breksje-tverrgangen tyder på liten/ingen fragmentering av magma ved eksplosjonene som skapte den. Ved sammenlikning av Witkop II og III, ser man en kraftigere utvikling av både breksje og sedimentpiper, og begge kompleksene har en ytre sone bestående av innoverhellende lag pga. mekaniske påkjenninger grunnet kollaps. Dette kan tyde på at dannelsen av breksje og sedimentpiper begge er resultater av lokalt oppbygning av trykk på grunn av kollaps. I Witkop I, som bare inneholder én breksje-tverrgang og med horisontale lagdelte sidebergart, har det vært lite kollaps med påfølgende mekanisk bøyning av sidebergarten.

8.2 Petrografi og ventdannelse

Ved å se på teksturer og mineralsammensetning i bergartsprøvene, kan man se hvorvidt ventkomplekset er dannet av freatiske eller freatomagmatiske eksplosjoner, eller om det er hydrotermalt påvirket. Tidsforløpet for autigene mineralvekster kan si noe om hvorvidt de diagenetiske reaksjonene pågikk før eller etter ventdannelsen, og man kan få et inntrykk over hvor lenge ulike prosesser i ventkomplekset pågikk.

Bergartene fra Witkop I har ingen hydrotermale mineraler som kvarts, sulfider, epidot eller amfibol. De autigene mineralene består hovedsaklig av kalifeltspat, albitt, kvarts og stedvis kalsitt. Tidsforløpet for de autigene mineralene er først utfelling av kalifeltspat og deretter kvarts og albitt. I de prøvene der kalsitt er observert, postdaterer denne utfellingen de andre autigene mineralene. Det vanligste hydrotermale mineralet som er observert i Stormberg gruppen, og det i forbindelser med doleritt-intrusiver eller basaltiske ekstrusiver, er zeolitt. Svensen et al. (foreligger) har funnet autigen zeolitt (laumontitt) med tekstur som postdaterer autigen vekst av kalifeltspat og kvarts. Fravær av zeolitt eller andre hydrotermale mineraler i sandsteinen som fyller Witkop I tilsier at den øverste delen av ventkomplekset ikke har vært hydrotermalt påvirket etter dets dannelse.

Kalifeltspat, albitt og kvarts er vanlige autigene mineraler under diagenesen. Autigen kalifeltspat kan faktisk felles ut ved temperaturer $< 50^{\circ}\text{C}$ (Bjørlykke et al., 1986) ved lav pH og kontinuerlig tilførsel av silika og aluminium. Kilden for dette kan være aluminiumhydroksider og biogen silika som er tilstede i sedimentet fra før. Kaliumkilden kan være frigitte K^{+} -ioner fra forvitningsprosesser. Fravær av magmatiske komponenter i breksje-tverrgangen tilsier at dannelsesprosessen ikke har vært dominert av freatomagmatiske eksplosjoner. Autigen vekst av kvarts og albitt har foregått omtrent samtidig i alle de studerte litologiene. Autigen kvartsutfelling foregår under temperaturer over 80°C mens veksten av autigen albitt foregår ved under temperaturer fra $75\text{--}200^{\circ}\text{C}$ (Milliken, 2004). Mulige kilder for kvartsen kan være silika frigitt under leirmineraltransformasjoner. Kilden for Na^{+} til den autigene albitten kan være frigitte Na^{+} -kationer etter oppløsningen av pertittlameller eller annen albitt. Autigen albitt og kvarts er begge dannet under begravningsdiagenesen ettersom det kreves en høy temperatur for utfelling av disse fasene. Den autigene kalsitten postdaterer albitt og kvarts. Kalsitt ble analysert for C- og O-isotopverdier for å avsløre kilden til fluidet som felte dette ut (se avsnittet under 8.5). $\delta^{18}\text{O}$ -veridene avhenger av temperaturen og $\delta^{18}\text{O}$ -verdien på porefluidet. Dette kan endre seg over tid og reagere på nytt med kalsitten og endre dets originale isotop-signatur. Isotop-analysene indikerer at kalsitten ikke er felt ut hydrotermalt. Sannsynligvis er det felt ut under begravningen. Ca^{2+} -kilden kan være frigitte Ca^{2+} -kationer ved albittisering av plagioklas hvis lagpakken har vært begravd mer enn 3 km., eller så kan det ha vært avsatt detrialt i sedimentet fra før av som fossiler og kalkskall.

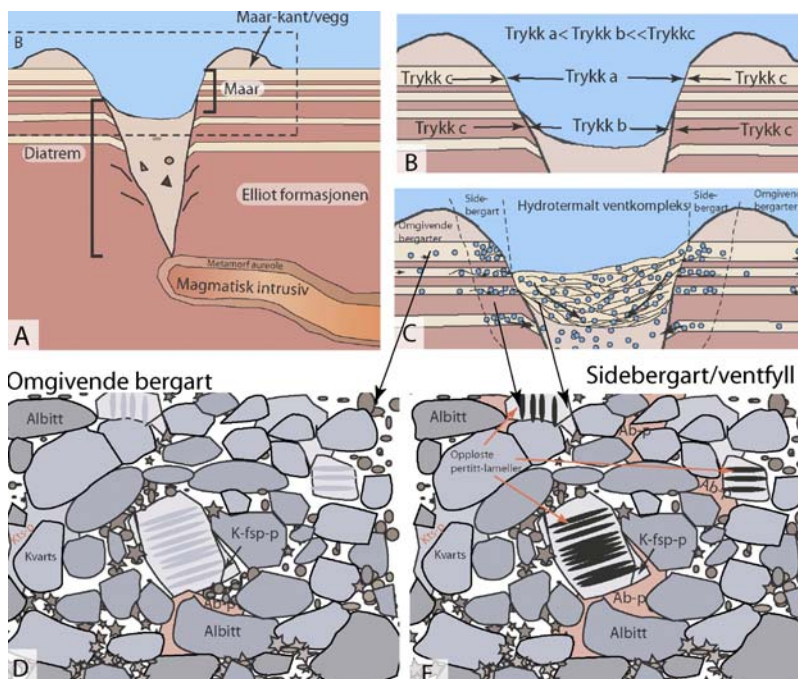
På basis av feltobservasjoner og petrografianalysener er det klart at den eksponerte delen av Witkop I representerer et gjenfylt krater av Clarens sand. Både avsetningen av Clarens sanden og utfellingen av de autigene mineralene postdaterer derfor selve ventdannelsen. Det er ikke funnet hydrotermale mineraler i noen av prøvene. Dette indikerer at en massiv konveksjon, med

påfølgende utleking av elementer fra kilderegionen, ikke har funnet sted i den øverste delen av ventkomplekset etter intrusjonen av magmaen.

8.3 Petrografi og morfologi på Witkop I

Årsaken til at ventkomplekset Witkop I står opp i terrenget kan være at den ”flint-liknende” overflaten gjør bergarten hard og motstandsdyktig mot erosjon. Svensen, 2001, har beskrevet liknende overflater fra andre steder og foreslått at den harde overflaten kan være et resultat av sillcrete-dannelse. Svensen fant mikrokrySTALLIN silika i porerommene. Derimot er det ikke funnet noe mikrokrySTALLIN silika som fyller porerommene i prøvene fra Witkop I. Sandsteinene i Witkop I har også en hard ”flint-liknende” overflate, og under denne overflaten ligger det porøs sandstein som løsner når man gnir på den. Det at Witkop I har en unik erosjonsform kan muligens forklares ut ifra observasjonen om at denne litologien har mer albittsement enn bergarten rundt. Mer albittsement kan ha medført en mindre permeabilitet, og mindre gjennomstrømming av meteorisk vann. Dette kan videre ha medført til at bergarten i Witkop I ble mindre utsatt for forvitring og erosjon.

Figur 8.1 er en modell som kan forklare årsaken til hvorfor Witkop I står ut i terrenget som en positiv erosjonsstruktur. Den viser hvordan bergartene som er mer utsatt for meteorisk vannstrømming har fått pertittlameller oppløst, noe som gir mer sekundær porøsitet, og mer kilde for albittsementering på et senere stadium av begravningsdiagenesen. Albittsementen kan virke hemmende for permeabiliteten. Dette fører videre til en bergart som er mindre utsatt for meteorisk vannstrømming i en erosiv fase etter begravningsdiagenesen. Sandsteinen som fyller Witkop I, har et større innhold av kalfeltspat med pertittlameller, og er derfor mer utsatt for denne prosessen. Bergarten i det hydrotermale ventkomplekset Witkop I er meget hard, men også meget porøs. Ettersom de fleste prøvene er kraftig forvitrede er det vanskelig å si hvorvidt oppløsningen av pertittlamellene fant sted før eller etter begravningsdiagenesen. Oppløsningen kan være resert. Se også figur 5.13.



Figur 8.1: En modell som muligens kan forklare hvorfor Witkop I og dens sidebergart står ut som en positiv erosjonsstruktur i terrenget.

A: Etter dannelsen av en maar og en diatrem er terrenget dominert av en nedsynkning. Noe av materialet er blåst ut og avsatt på overflaten.

B: Pga. masseangel i ventkomplekset er det mindre trykk som virker mot sidebergarten enn vanlig.

C: I følge Darcys lov vil fluidet strømme i retningen med minst poretrykk, som er i nærheten av ventkomplekset. Sidebergarten og ventfyllet er dermed utsatt for mer meteorisk vannstrømming i forhold til de omgivende bergartene.

D: En illustrasjon som viser teksturen fra en kremgul sandstein fra de omgivende bergartene.

E: En illustrasjon som viser teksturen fra en kremgul sandstein fra ventfyllet eller fra sidebergarten. Pga. mer meteorisk vannstrømming er perititlamellene mer oppløst, noe som gir mer sekundær porøsitet, og mer kilde for albittsementering

8.4 Implikasjoner av hastighetsmålinger

Fra kapittel 6 er det gjort rede for ulike hastighetsmålinger for 4 sandsteiner og en slambergart og hvorledes de reagerer forskjellig mot trykk. Det viser seg at prøvene fra ventkomplekset Witkop I har lavere hastigheter når det gjelder både P- og S-bølger i forhold til prøvene fra området rundt. Dette kan ha sammenheng med at ventbergartene har en litt større porøsitet i forhold til omkringliggende litologier (tabell 6.2). Den ene sandsteinsprøven som er innehentet fra logg 1 har en betydelig større S-bølge hastighet enn sandsteinene fra ventkomplekset, uten at det lyktes å finne en innlysende forklaring på dette. Det kreves flere hastighetsprøver for å finne ut om denne prøven (KO1S-3) er representativ for de kremgule sandsteinene som ligger utenfor Witkop I.

8.5 Indikasjoner på postvent fluidmigrasjon

Det er nylig blitt dokumentert av Svensen et al.(2004), at magmatiske intrusiver har modnet hydrokarboner og frigitt metan til atmosfæren via flere hydrotermale ventkomplekser fra Møre- og Vøring-bassengene. Dette er tolket å ha utløst den globale oppvarmingen i tidlig-Eocen. Det er også vist at øyeformede hydrotermale ventkomplekser kan fungere som sekundære migrasjonsveier for fluider lenge etter deres dannelse. Karoo-bassenget er også et vulkansk basseng som Møre- og Vøring-bassengene, hvor det er hyppige forekomster av hydrotermale ventkomplekser, og den magmatiske hendelsen pågikk for 183 ± 1 Ma (Duncan et al., 1997). For å

finne kilden til fluidet som felte ut kalsitten i Witkop I samt utfellingstemperaturen, ble det utført stabile lette isotop-analyser (^{12}C - ^{13}C og ^{16}O - ^{18}O) på kalsitter.

$\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB-verdiene av kalsitt som er felt ut fra vandige løsninger kontrolleres av ulike faktorer som $\delta^{13}\text{C}$ -verdien av CO_2 i likevekt med kalsitten i løsningen. $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene av kalsitten er mindre avhengig av temperatur i forhold til $\delta^{18}\text{O}$ -verdiene. Fraksjoneringen av karbonisotopene er mer bestemt av oksidasjonstrinnet til karbonstoffet (Buchardt, 1983). Det blir tatt opp mer ^{13}C i de oksiderte karbonforbindelse enn de reduserte ($\text{CH}_4 < \text{CH}_2\text{O} < \text{CO}_2 < \text{CaCO}_3$). Karbon reduseres ved fotosyntesen, og ved nedbrytning av organisk materiale vil $\delta^{13}\text{C}$ -verdien være avhengig av nedbrytningsprosessene. Fraspalting av metan fører til store fraksjoneringer mellom nedbrytningsproduktet og det organiske materialet (Buchardt, 1983).

Fluidkilde

Isotop-verdier varierer i ulike geologiske miljøer. Fra Buchardt (1983) ser man at klastiske sedimenter kan ha $\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB-verdier mellom -23 til -4, og fra tabell 7.1 ser man at alle prøvene har verdier innenfor dette spennet. Typiske $\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB -verdier for hydrotermale avsetninger er -30 til -6; magmatiske avsetninger: -32 til -15; meteoriske vann i arid miljø: -23 til -32; ferskvann: -15 og -1. Fra tabell 7.1 ser man at $\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB-verdiene for alle prøvene er høyere enn det som er vanlig for magmatiske avsetninger, slik at man kan utelukke dette som en alternativ fluidkilde. Man kan derimot ikke utelukke at fluidkilden var hydrotermal eller fra ferskvann, ettersom $\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB -verdiene for prøvene ligger mellom spennet for disse geologiske miljøene. Man kan derimot, på basis av $\delta^{18}\text{O}$ ‰ PDB-verdiene (se figur 7.3), si at kalsitten som er felt ut i Witkop I-området, med unntak av to prøver (KO1S-2 og KO1S-18A), ikke er hydrotermalt utfelt.

Prøvene fra den kalsittsementerte sediment-pipeliknende strukturen og linsen med breksjert materiale, har en svak utarming av ^{13}C , med ^{13}C -verdier som ikke skiller seg ut fra bakgrunnsedimentene. Det betyr nødvendigvis ikke at kalsitten ikke ble felt ut av metan, selv om metan har en sterk utarming av ^{13}C . Veldig lette C-isotopverdier kan tyde C-kilde fra oksidert organisk materiale.

Utfellingstemperatur

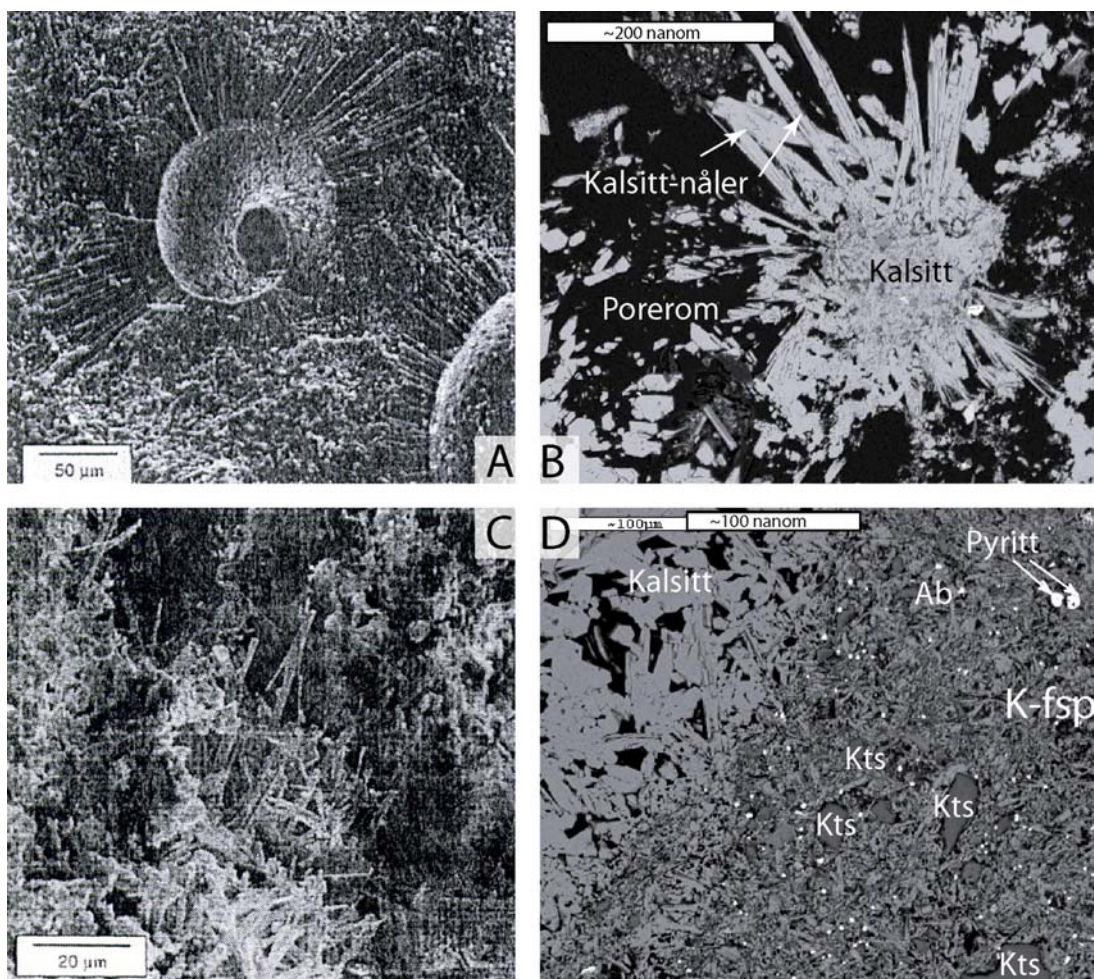
Ved å anta en geotermal gradient på $30^\circ\text{C}/\text{km}$, noe som er vanlig i sedimentære bassenger, og en dybde på ca. 1,4 km (det vil si en tykkelse på overflatebasaltene på 1,4 km, Eales et al. 1984), kan man anta at bergartene rundt Witkop I har vært utsatt for temperaturer på ca. 62°C , hvis

overflatetemperaturen er ca. 20°C. Derimot er ikke Karoo-bassenget et basseng som kun består av sedimenter. Over Clarens formasjonen er det nemlig store masser av basaltiske lavaer, med en mektighet opp til 1400 m (Eales et al., 1984). Trolig har dette hatt en varmeeffekt på bergartene under og forhøyet den geotermale gradienten. Man kan dermed anta at bergartene rundt Witkop I har vært utsatt for temperaturer høyere enn 62°C.

Fra figur 7.3 ser man at den utfelte kalsitten fra Witkop I har en utfellingstemperatur mellom 36-72°C, noe som utelukker en hydrotermal utfelling av kalsitt. Det er kun to prøver som viser en utfellingstemperatur som kan være over 100°C, prøve KO1S-2 (en kalsittåre fra logg 1) og prøve KO1S-21 (fra logg 3). Utfellingstemperaturen er regnet ut fra likning 3.10 etter Epstein et al. (1953), og den avhenger som tidligere nevnt av $\delta^{18}\text{O}$ -verdien til formasjonsvannet. Dette er en usikker faktor, og i tillegg kan porevannet endre seg under diagenesen slik at det reagerer på nytt med kalsitten. På den måten vil den originale isotop-signaturen til kalsitten bli vasket bort og fornyet.

Petrografisk er det spesielt én prøve som skiller seg ut fra de andre, og det er prøve KO3HS-29. Denne prøven har autigene kalsittnåler som har vokst ut fra en kjerne som består av korn som kvarts, albitt og kalifeltspat samt pyritt som ligger inni en mikrittisk matriks (figur 8.2 B og D). Denne prøven inneholder spor av strontium, og den luminiserer ikke i CL-mikroskop. Det er observert liknende petrografi av aragonittnåler fra "cold-seeps" (geologiske strukturer dannet av gjennosivende gass), der kalsitten er felt ut som følge av oksidering av metan (figur 8.2 A og C). I dette tilfellet er $\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB -verdiene lavere på grunn av utarming av ^{13}C i metan (Aloisi et al., 2001). Porevannet i overflatesedimenter blir påvirket av metanmigrasjon og gjennomstrømmingen av gass kontrolleres av biologisk oksidering av metan som utføres av mikroorganismer (Aloisi et al., 2001).

Anaerob oksidering av metan er koplet med sulfatreduskjon. Ved store konstrasjoner av SO_4^{2-} , samt stort $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ -forhold favoriseres det utfelling av aragonitt fremfor kalsitt. Aragonitt går lett over til kalsitt, og det er mulig at dette har skjedd i prøvene fra Witkop I. Ut fra XRD-analysen til prøve KO3HS-29 (appendiks 10.11) ser man at karbonatmineralet er kalsitt og ikke aragonitt. Porefluidet kan ha endret sammensetning slik at $\delta^{18}\text{O}$ -og $\delta^{13}\text{C}$ -innholdet er endret, og den originale isotopsignaturen fornyet. Aloisi et al.(2000) har også observert pyritt i nodulene som indikerer en aktiv sulfatreduskjon. Forekomst av pyritt i prøve KO3HS-29, kan indikere en likende dannelse som "cold-seep"-strukturene til Aloisi et al. (2000).



Figur 8.2: Sammenlikning av tekstur mellom kalsittnåler fra prøve KO3HS-29 (B og D) og aragonittnåler (A og C) hentet fra Aloisi et al., 2000. **A:** SEI-bilde av aragonitt-nåler som vokser ut fra et pteropod-skjell fra Napoli leirvulkan. **B:** BSE-bilde fra prøve KO3HS-29, som viser kalsittnåler som vokser ut fra en kjerne (D). **C:** SEI-bilde av aragonittkrystaller som fyller porerom fra Amsterdam leirvulkan. Aragonitt-kilden er pelagitter. **D:** BSE-bilde av prøve KO3HS-29, som viser kjernen der kalsittnålene har vokst ut fra.

Egne data er plottet mot Faure og Cole sine data (1999) i figur 7.5. De har studert kalsittholdige skifre (Tierberg-, Prince Albert- og Whitehill formasjonene) som ligger på et lavere stratigrafisk nivå enn Stormberg gruppen (Molteno-, Elliot- og Clarens formasjonene). Fra litteraturen er det kjent at de magmatiske intrusivene har sine foretrukne horisonter i Karoo-bassenget, og at de forekommer hyppigst ved kontakten mellom Dwyka- og Eccca gruppene, Prince Albert – og Whitehill formasjonen og mellom øvre Eccca- og nedre Beaufort gruppene (Gevers, 1928). Sammenlikningen er gjort for å se hvorvidt kalsitten som er felt ut i ventkomplekset kan ha sin opprinnelse fra kalsittholdige skifre på et lavere stratigrafisk nivå, eller modnet hydrokarboner grunnet varmeeffekten fra intrusivene som ligger på de foretrukne horisontene. Fra figur 7.4 ser man at Whitehill formasjonen har meget lik isotop-signatur som bakgrunnsedimentene fra Witkop

I-området. Prøvene fra ventkomplekset, derimot, viser en mindre utarming av ^{13}C og ^{18}O i forhold til de kalsittholdige skifrene på et lavere stratigrafisk nivå.

Breksje-tverrgangen representerer en struktur som er av postventdannelse. Det behøver ikke å bety at Witkop I har fungert som en sekundær migrasjonsvei for fluidene som dannet denne tverrgaen. Breksje-tverrgangen er et resultat av prosessene som pågår i de magmatiske intrusivene som er plassert rett under ventkomplekset, eller som resultat av kollaps som medfølger overtrykk i undergrunnen. Breksje-pipen inneholder ikke kalsitt, noe som kan tyde på at den ikke er dannet av metan. Fluidet som dannet breksje-tverrgangen, var sannsynligvis av en eksplosiv art, som skapte sprekker ("hydrofracturing") slik at den kunne propagere oppover. Strukturen er derfor sannsynligvis ikke et resultat av rolig oppad-migrerende fluidier, men heller av et selvpropagerende sprekkesystem.

8.6 Leirmineralogi

Fra kapittel 5.10 og appendiks 10.31 ser man at illitt/kloritt-forholdet i de særegne bergartene i Witkop I har høyere verdi. Breksje-tverrgangen har et illitt/kloritt-forhold på 1,35, som er et betraktelig mindre klorittinnhold enn de andre prøvene. Årsaken til dette kan være at det meste av kloritten som er i sedimentet er detrialt og ikke autigent. En kloritt-anomali som breksje-tverrgangen, kan tyde på en litologi med mindre detrialt kloritt har intrudert en litologi med et høyere detrialt kloritt-innhold på et høyere stratigrafisk nivå.

8.7 Andre forklaringer

Hvordan kan man være så sikker på at Witkop I faktisk representerer den øverste eksponerte delen av et hydrotermalt ventkompleks, altså innfyllingen i et krater. Det kan ha vært andre årsaker til at en kremgul sandsteinsmasse på ~70 m høyde og ~80 m bredde kutter i en ellers horisontalt stratifisert sedimentlagpakke. En normalforkastning eller en sidelengsforkastning, med en vertikal forflytning på ~58 m, kan være en mulig forklaring.

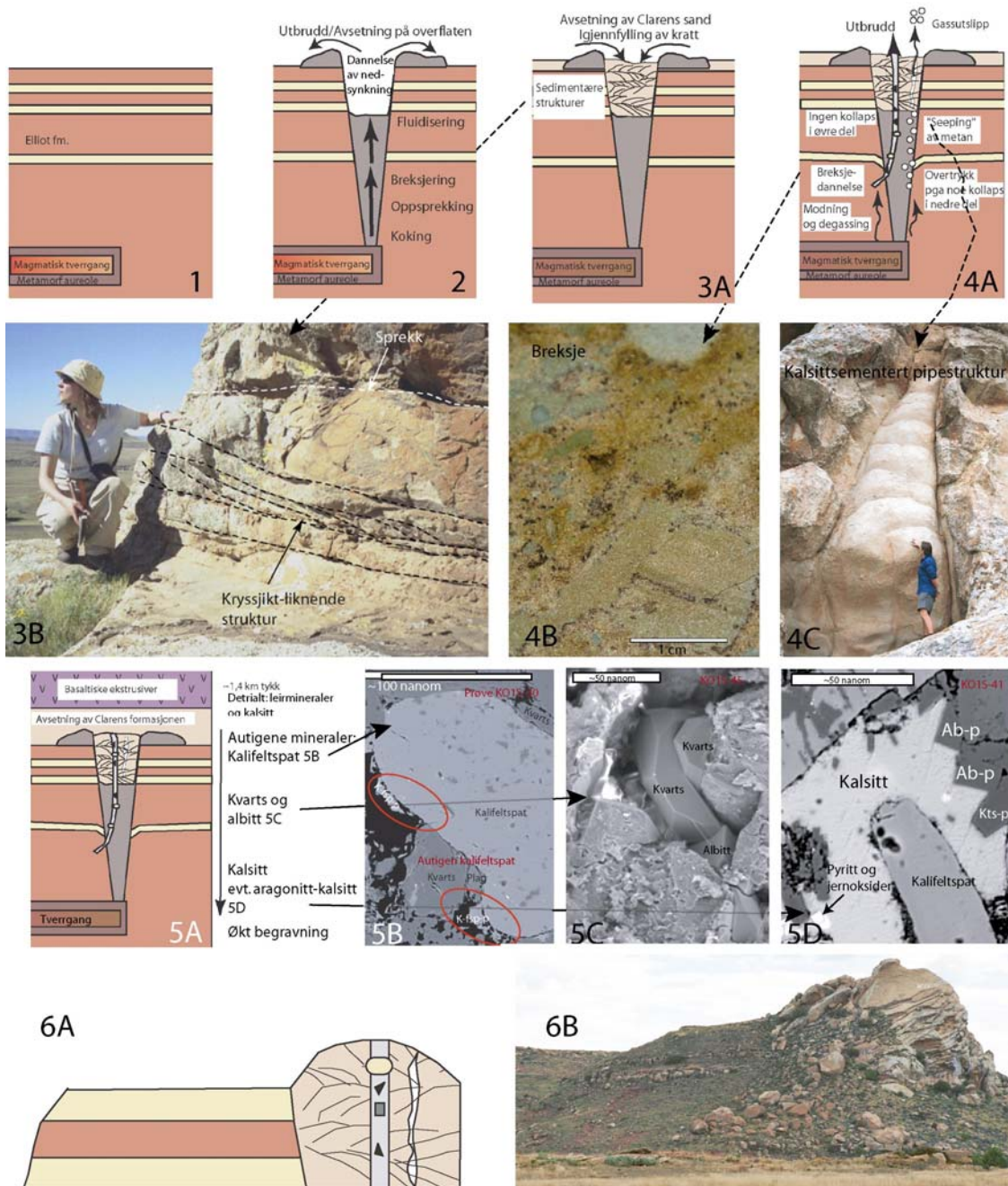
Grensen mellom den kremgule sandsteinsmassen (Witkop I) og stratigrafien som den kutter er dessverre overdekt av løse blokker. Hvis denne sandsteinsmassen ble forflyttet nedover pga. en normal forkastning skulle man forvente å se et forkastningsplan, og muligens noe slickensides eller kataklase. Videre ser man fra det geologiske kartet i figur 4.4 at grensen mellom den kremgule sandsteinen og stratigrafien den kutter, krummer som en halvsirkel. En ringformet

normalforkastning er vanligvis assosiert med kalderaer, som en vulkansk kollapsstruktur. Ringformede forkastningsplan består ikke av ett individuelt forkastningsplan som strekker seg rundt hele ringen. Der en forkastning dør ut fortsetter forflytningen langs et nytt forkastningsplan som overlapper det forrige. Ringformede forkastningsplan består dermed av flere diskontinuerlige normalforkastninger. Den kremgule sandsteinen som fyller Witkop I, inneholder sprekker, men ingen forkastningsplan med vertikal forflytning av massene. Man kan derfor se bort ifra at det er ringformede forkastninger som er årsak i den vertikale forflytningen på ~58 m.

8.8 Dannelsesmodell

Svensen et al. (foreligger.) har foreslått en dannelsesmodell for utviklingen av sedimentdominerte hydrotermale ventkomplekser, basert på observasjoner og tolkninger av Witkop II og III. Modellen går ut på at magmatiske lagganger som intruderer et sedimentbasseng fører til at fluider ekspanderer og koking av porefluidet. I tillegg produseres det karbon-gasser av den raske modningen av organiske materialer i kontaktaureolene. Dette øker poretrykket som videre starter "hydrofracturing" (selvpropagerende oppsprekning), som igjen skaper en vertikal fluid migrasjon med oppknusning av sedimentære bergarter. Hovedbestanddelen i den vertikale "kanalen" er sediment-breksjer, som tyder på liten eller ingen oppsprekking av den magmatiske intrusiven. Hydrotermale løsninger feller ut zeolitt på varierende nivåer i ventkomplekset, både i indre og ytre sone. Etterfølgende kollaps og tilting av omgivende bergarter kan skape fluidisering av sedimenter gjennom piper og tverrganger.

Ettersom det kun er den øvre delen av det hydrotermale ventkomplekset, Witkop I, som er eksponert i dagen, fins det ingen bevis som motargumenterer dannelsesmodellen til Svensen et al. (foreligger). Feltobservasjonene fra Witkop I viser ingen tilting av bergartene i den ytre sonen eller hydrotermal påvirkning. I tillegg er det observert sedimentære strukturer i komplekset, noe som tyder på in situ avsetning. Derfor foreslås det en noe modifisert dannelsesmodell for Witkop I (Figur 8.2).



Figur 8.3: Dannelsesmodell for Witkop I.

1) En magmatisk tverrgang intruderer i en sedimentær lagpakke.

2) Den varme intrusiven varmer opp porevannet og det dannes freatiske eksplosjoner. Et selvpropagerende sprekkesystem dannes, litologien fluidiseres og ekstruderes på overflaten. Materiale avsettes på paleoverflaten, og det dannes en nedsynkning på overflaten.

3) **A:** Clarens sanden avsettes og nedsynkingen på overflaten gjenfylles. **B:** Det dannes sedimentære strukturer.

4) **A:** På grunn av massebevegelser og muligens kollaps av materiale, bygges det opp lokalt trykk som skaper breksjer og dannelse av breksje-dyke **B.** På grunn av modning av organisk materiale i aureolene, siver det gass opp gjennom lagpakken og ut i atmosfæren. Oksidering av metan medfører utfelling av kalsitt i en pipe-liknede struktur **C.**

5) **A:** Ekstrusjon av basalter, med en mektighet over 1,4 km, medfører begravning av sedimentene. På et tidlig stadium av diagenesen felles det ut autigen kalifeltspat **B.** På en større begravning og høyere temperatur vokser det autigen kvarts og albitt **C:** Kalsitt felles ut ved en enda større begravning. **D:** Eventuelle aragonittfaser går over til kalsitt.

6) Etter erosjon står Witkop I ut i terrenget som en positiv struktur. **A:** illustrasjon **B:** Bilde av Witkop I i felt.

8.9 Konklusjon

Følgende karakteristikk av et hydrotermalt ventkompleks, Witkop I, er identifisert, når det gjelder struktur, mineralogi, petrografi, petrofysiske egenskaper og stabile lette isotoper:

- Et hydrotermalt ventkompleks som grenser til en vertsbergart bestående av horisontale sedimentære lag, representerer fyllet i et krater.
- Sedimentære strukturer som kryssjikt og dyne-liknende struktur, samt fravær av "slumping"-strukturer (utglidningsstrukturer), viser at ventfyllet er avsatt in situ.
- Fravær av en ytre sone med lag som heller inn mot den indre sonen, tyder på liten eller ingen mekanisk påvirkning av sidebergart. Dette betyr igjen at det har foregått liten eller ingen nedovergående transport av masse pga. kollaps.
- Andre hydrotermale ventkomplekser som har en ytre sone av tildede lagenheter, er også assosiert med hyppige forekomster av breksje, sedimenttverrganger og pipestrukturer. I Witkop I er det kun observert én breksje-tverrgang som kutter i ventfyllet. I og med at det har vært liten nedadgående transport i Witkop I, kan denne sammenhengen bety at dannelsen av breksje-, pipe- og sediment-tverrganger er resultat av lokalt oppbygning av trykk pga. kollaps.
- Lette isotopdata tilsier at fyllet i krattet/nedsynkningen ikke har vært gjennomstrømmet av magmatiske fluider. Fluidet har heller ikke en opprinnelse i hydrokarboner, og er derfor sannsynligvis fra meteorisk vann.
- De autigene mineralene som er studert i Witkop I er som følge av vanlig begravellesdiagenese. Fravær av hydrotermale mineraler i ventkomplekset tilsier at den øverste delen av komplekset ikke har vært påvirket hydrotermalt.
- Kalsitnåler fra en linse med grovere materiale i ventkomplekset tyder på "seeping"-gjennomsving av gass eller et porefluid som har medført vekst av kalsitnåler som har vokst ut i porerommene.

KAPITTEL 9 REFERANSER**9.0 Referanser**

- Alley, R.B. og Cuffey, K.M., 2001. Oxygen- and Hydrogen-Isotopic Ratios of Water in Precipitation: Beyond Paleothermometry. I: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, vol. 43; Stable Isotope Geochemistry. Valley, J.W og Cole, D.R. (red). The Mineralogical Society of America, Washington DC, USA. s. 527-553.
- Aloisi, G., Pierre, C., Rouchy, J.-M., Foucher, J.-P., Woodside, J., 2000. Methane-related autigenic carbonates of eastern Mediterranean Sea mud volcanoes and their possible relation to gas hydrate destabilisation. Earth and Planetary Science Letters, 184, s. 321-338.
- Beukes, N.J., 1970. Stratigraphy and sedimentology of the Cave Sandstone, Karoo System. I: Second Gondwana Symposium: Proceedings and Papers, Counc. Sci. Ind. Res., Pretoria, s. 321-342.
- Biegeleisen, J. og Mayer, M. G., 1947. Calculation of equilibrium constants for isotopic exchange reactions; Jour. Chem. Physics, 15, s. 261-267.
- Bjørlykke, K., Aagaard, P., Dypvik, H., Hastings, D. S. og Harper, A. S., 1986. Diagenesis and reservoir properties of Jurassic sandstones from the Haltenbanken area, offshore mid Norway. Spencer, A. M. (red). I: Habitat of hydrocarbons on the Norwegian continental Shelf, proceedings of an international conference. Graham and Trotman, London UK.
- Brown, G. og Brindley, G.W., 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. Brown, G. og Brindley, G.W. (red). I: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification.
- Buchardt, B., 1983. Introduksjon til stabile isotopers geokjemi. Trykk: Bent Mortensen. Intern rapport, 58 s.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L. og Eastwood, R. L., 1985. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic rocks. Geophysics, 50; 4, s. 571-581.
- Catuneanu, O., Hancox, P.J. og Rubidge, B.S., 1998. Reciprocal flexural behaviour and contrasting stratigraphies: a new basin development model for the Karoo retroarc foreland system, South Africa. I: Basin Research, 10, s. 417-439.
- Chevallier, L., Goedheart M., og Woodford, A., 2001. The influences of dolerite sill and ring complexes on the occurrence of groundwater in Karoo fractured aquifers: a morpho-tectonic approach, Water Research Commission, WRC Report No 937/1/01.
- Chevallier, L., og Woodford, A., 1999. Morpho-tectonics and mechanism of emplacement of the dolerite rings of the western Karoo, South Africa. I: S. Afr. J. Geol., 102(1), s. 43-54.
- Clement, C.R., 1982. A comparative study of some major kimberlite pipes in the Northern Cape and Orange Free State. Ikke publisert Ph.D. Thesis. University of Cape Town, 432 s.
- Cole, D.I., 1992. Evolution and development of the Karoo Basin. de Wit M.J. and Ransome I.G.D. (red.) I: Inversion Tectonics of the Cape Fold Belt, Karoo and Cretaceous Basins of Southern Africa. Balkema, Rotterdam, s. 87-99.
- Dingle, R.V., Siesser, W.G. og Newton, A.R., 1983. Mesozoic and Tertiary geology of Southern Africa. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 383 s.
- Du Toit, A.L., 1904. Cape of Good Hope. Ann. Reo. Geol. Comm. Cape of Good Hope, 165 s.

- Du Toit, A.L., 1912. Geological Survey of part of the Stormbergen. Annual Report Geological Comm. Cape of Good Hope for 1911, 16, s. 112-136.
- Du Toit, A.L., 1920. The Karoo dolerites -a study in hypabyssal intrusion. I: Trans. Geol. Soc. S. Afr., 23, s. 1-42.
- Du Toit, A.L., 1954. Geology of South Africa. Olivier and Boyd, Edinburgh, 611 s.
- Duncan, R.A., Hooper, P.R., Rehacek, J., Marsh, J.S. og Duncan, A.R., 1997. The timing and duration of the Karoo igneous event, Southern Gondwana. I: Journal of Geophysical Research, 102, s. 18127-18138.
- Dypvik, H., 2001. Kompendium i G341, Sedimentpetrografi. Universitetet i Oslo. Saigal, GL342-kompendium i Katodeluminesens.
- Eales, H. V., Marsh, J. S. og Cox, K. G., 1984. The Karoo igneous province: an introduction. I Petrogenesis of the volcanic rocks of the Karoo Province. Erlank, A. J. (red.) Spec. Publ. Geol. Soc. S. Afr., 13, s. 1-26.
- Ensley, R. A., 1984. Comparison of P- and S-wave seismic data; a new method for detecting gas reservoirs. Geophysics 49; 9, s. 1420-1431.
- Epstein, S., Buchbaum, H. A., Lownstam, H. A. og Urey, H. C., 1953. I: Bull. Geol. Soc. Am., 64, 1315 s.
- Eriksson, P.G., 1981. A palaeoenvironmental analysis of the Clarens Formation in the Natal Drakensberg. I: Trans.Geol. Soc. S. Afr., 84, 1, s. 7-17.
- Eriksson, P.G., 1984. A paleoenvironmental analysis of the Molteno Formation in the Natal Drakensberg. Verhandeling van die Geologiese Verening van Suid Afrika. I: Trans. Geol. Soc. S. Afr., 87, 3, s. 237-244.
- Faure, K. og Cole, D., 1999. Geochemical evidence for lacustrine microbial blooms in the vast Permian Main Karoo, Paraná, Falkland Islands and Huab basins of southwestern Gondwana. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 152. s. 189-213.
- Fowler, C.M.R., 1990. The Solid Earth, An introduction to global geophysics. Cambridge University Press, 472 s.
- Friedman, I. og O'Neil, J. R., 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. I: Geol. Surv. Prof. Paper 440-KK.
- Gauffre, F.X., 1993. Biostratigraphy of the Lower Elliot Formation (Southern Africa), and Preliminary Results on the Maphutseng dinosaur (Saurischia: Prosauropoda) from the same Formation of Lesotho. S.G. Lucas and M. Morales (red.) I: The Nonmarine Triassic, Bull. New Mexico Mus. Nat. Hist., 3, s.147-150.
- Gevers, T.W., 1928. The volcanic vents of the Western Stormberg. I: Trans. Geol. Soc. S. Afr., 31, s. 43-62.
- Gjelle, S. og Sigmond, M. O., 1994. Bergartsklassifisering og kartsammenstilling. Helge Høgdaahl (red.) Utgiver: Norges geologiske undersøkelse.
- Hancox, P.J., 1998. A Stratigraphic, Sedimentological and Palaeoenvironmental synthesis of the Beaufort-Molteno contact in the Karoo Basin. Ikke publisert Ph.D. Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Hanson, R.B., 1992. Effects of fluid production on fluid flow during regional and contact metamorphism. I: J. Met. Geol., 10, s. 87-97.
- Hanson, R.B., 1995. The hydrodynamics of contact metamorphism. I: GSA Bulletin, 107; nr. 5; s. 595-611.
- IFE, Institutt for energiteknikk, 2004. IFE/KR/F-2004/040. Data report -Isotope analysis on carbonate. 2027 Kjeller, Norge.
- Jamtveit, B., Svensen, H., Podladchikov, Y. og Planke, S., (i trykken). Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. Geological Society of London, Special Publications.

- Jackson, A.A., 1997. Glossary of Geology. Jackson, A.A. (red.) American Geological Institute, Alexandria, USA.
- Johnson, M.R., 1966. The stratigraphy of the Cape and Karoo systems in the Eastern Cape Province. Ikke publisert Msc Thesis, Grahamstown, Rhodes Univ.
- Johnson, M.R., 1976. Stratigraphy and sedimentology of the Cape and Karoo Sequences in the Eastern Cape Province. Ikke publisert Ph.D. Thesis, Rhodes Univ., Grahamstown, 335 s.
- Johnson, M.R., Van Vuuren, C.J., Visser, J.N.J., Cole, D.I., Wickens, H. de V., Christie, A.D.m. og Roberts, D.L., 1997. The Foreland Karoo Basin, South Africa. African Basins, Sedimentary Basins of the World, 3. Selley, R.C. (red.) Elsevier Science B.V., Amsterdam, s. 269-317.
- Kearey, P. og Brooks, M. 1995. An Introduction to Geophysical Exploration. (Hallan, A. (red.) Blackwell Science, University Press, Cambridge, Great Britain, 254 s.
- Keyser, N., 1997. Geological Map of the Republic of South Africa and the Kingdoms of Lesotho and Swaziland. 1:1.000.000. Council for Geoscience, South Africa.
- Kingsley, C.S., 1981. A composite submarine fan-delta-fluvial model for the Ecca and Lower Beaufort Groups of Permian age in the eastern Cape Province, South Africa. Johannesburg, Trans. I: Geol. Soc. S. Afr., 84, s. 27-40.
- Klein og Hulbut, 1993. Manual of Mineralogy. John Wiley and Sons, Inc., 681 s.
- Kokelaar, B.P., 1982. Fluidizing of wet sediments during the emplacement and cooling of various igneous bodies. I: J. Geol. Soc. London, 139, s. 21-33.
- Lister, J.R. og Kerr, R.C., 1991. Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes. I: J. Geophys. Res., 96, s.10,049-10,077.
- Lock, B.E., 1978. Ultrahigh temperature volcanic mudflows amongst the Drakensberg volcanic rocks: New criteria for their recognition. Trans. Geol. Soc. S. Afr., 81, s. 55-60.
- Lorenz, V., 1985. Maars and Diatremes of phreatomagmatic origin: a review. I: Trans. Geol. Soc. S. Afr., 88, s. 459-470.
- Marsh, J.S., 1998. IVC'S Field Excursion Guide Book, Fieldexcursion A3: Karoo volcanic and intrusive rocks, Eastern Cape. IAVCEI International Volcanological Congress, Cape Town.
- Marsh, J.S., Hooper, P.R., Rehacek, J., Duncan, R.A. og Duncan, A.R., 1997. Stratigraphy and age of Karoo basalts of Lesotho and implications for correlations within the Karoo igneous province. Mahoney, J. J. og Coffin, M. F (red.) I: Large igneous provinces; continental, oceanic, and planetary flood volcanism. Geophysical Monograph, 100; s. 247-272.
- McCormack, M.D., Justice, M. G. og Sharp, W. W., 1985. A stratigraphic interpretation of shear and compressional wave seismic data for the Pennsylvanian Morrow Formation of southeastern New Mexico. I: Seismic stratigraphy II; an integrated approach to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 39; s. 225-239.
- Milliken, K.L., 2004. Late Diagenesis and Mass Transfer in Sandstone-Shale Sequences. I: Treatise on Geochemistry. Holland, H. D. og Turekian, K. K. (red). 7: Sediments, Diagenesis, And Sedimentary Rocks. Mackenzie, F. T. (red). Elsevier, Amsterdam.
- Mitchell, R.H., 1986. Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry and Petrology. Plenum Press, New York, s. 74-104.
- Moore, D. M. og Reynolds Jr., R. C., 1997. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Pbl.: Oxford University Press, 378 s.
- Omnes, G., 1978. Exploring with SH-waves. Journal of Canadian Society of Exploration Geophysics. 14; 1, s. 40-49.

- Olsen, P.E. og Galton, P.M., 1984. A review of the reptile and amphibian assemblages from the Stormberg of Southern Africa with special emphasis on the footprints and the age of the Stormberg. I: *Palaentologia Africana*, 25, s. 87-110.
- Picket, G. R., 1963. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum Technology*. 15; 6, s. 659-667.
- Ramm, M., 1991. On Quantitative Mineral Analysis of Sandstones using XRD by Morgens Ramm. Institutt for geologi, Universitetet i Oslo.
- Rowell, D.M. og De Swardt, A. M. J., 1976. Diagenesis in Cape And Karoo Sediments, South Africa, And Its Bearing on Their Hydrocarbon Potential. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, 79, 1, s. 81-145.
- Ryan, P.J., 1967. A basin analysis of the Wateberg coal-field. Ikke publisert rapport Geol. Surv. S. Afr.
- SACS (South African Committee for Stratigraphy), 1980. Stratigraphy of South Africa. Part 1: Lithostratigraphy of the Republic of South Africa, South West Africa/Namibia, and the Republics of Bophuthatswana, Transkei and Venda. *Handbk. Geol. Surv. S. Afr.*, 8, 690 s.
- Seme, U.T., 1997. Diatreme deposits near Rossouw, north Eastern Cape Province: Sedimentology-volcanology and mode of origin. A dissertation submitted at the department of Geology, Rhodes University, as a partial fulfilment of B Sc. (Hons) in Geology.
- Smith, R.H.M., 1990. A review of stratigraphy and sedimentary environments of the Karoo Basin of South Africa. I: *J. Afr. Earth Sci.*, 10, s. 117-137.
- Svensen, H., 2001. Karoo Field Report 2001. Ikke publisert konfidensiell rapport som en del av "Petroleum Implications of Sill Intrusion" prosjektet.
- Svensen, H., Jamtveit B., Planke, S. og Chevallier, L. Structure and evolution of hydrotermale vent complexes in the volcanic Karoo Basin, South Africa. Foreligger hos *Journal of Geology, Society of London*.
- Svensen, H. og Planke, S. 2003. Karoo Field Guide 2003. Ikke publisert konfidensiell rapport som en del av "Petroleum Implications of Sill Intrusion" prosjektet (se <http://vbpr.no/projects>).
- Svensen, H., Planke, S., Jamtveit, B., Pedersen, T., 2003. Seep carbonate formation controlled by hydrothermal vent complexes: a case study from the Vøring volcanic basin, the Norwegian Sea. *Geo-Maritime Letters*, 23, s. 351-385.
- Svensen, H., Planke, S., Malthe-Sørenssen, A., Jamtveit, B., Myklebust, R., Eiden, T.R. og Rey, S. S., 2004. Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*, 423, s. 542-545.
- Tatham, R.H., 1982. V_p , V_s and lithology. *Geophysics*, 47; 3, s. 336-344.
- Terry, R.D. og Chilingar, G.V., 1955. Summary of Concerning some additional aids in studying sedimentary formations by M. S. Shvetsov. *Journal of Sedimentary Petrology*, 25, s. 229-234.
- Turner, B.R., 1972. Silica diagenesis in the Molteno sandstone. I: *Trans. geol. Soc. S. Afr.*, 75, s. 55-66.
- Turner, B.R., 1985. Uranium mineralisation in the Karoo basin, South Africa. *Econ. Geol.*, 80, s. 256-269.
- Twenhofel, W. H., 1937. Terminology of the fine-grained mechanical sediments. National Research Council, Division of Geology and Geography. Årlig rapport for 1936-1937, appendiks 1, F, s. 81-104.
- Visser, J.N.J, Looek, J.C. og Jordaan, M.J., 1980. Permian deltaic sedimentation in the western half of the Karoo Basin. I: *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, 83, s. 415-424.

- Visser, J.N.J. og Botha, B.J.V., 1980. Meander channel, point bar, crevasse splay and aeolian deposits from the Elliot Formation, in Barkly Pass, North-eastern Cape. I: Trans. Geol. Soc. S. Afr., 83, s. 55-62.
- Visser, J.N.J., 1989. The Permo-Carboniferous Dwyka Formation of Southern Africa: deposition by a predominantly subpolar marine ice sheet. I: Palaeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 70, s. 377-391.
- von Bruun, V. og Visser, J.N.J., 1999. Lithostratigraphy of the Mbizane Formation (Dwyka Group). Council for Geoscience / South African Committee for Stratigraphy. Pretoria, South Africa. Lithostratigraphic Series 32.
- Walker, G.P.L., 1970. Compound and simple lava flows and flood basalts. Bull. Vulcanol., 35, s. 579-590.
- Walker, G.P.L., 1993. Basaltic-volcano systems. Prichard, H.M., Alabaster, T., Harris, N.B.W og Neary, C.R. (red.) Magmatic processes and plate tectonics. I: Geol. Soc. Spec. Publ., 76, s. 3-38.
- Welton, J.E., 1950. SEM Petrology Atlas. Pbl. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, USA. Ed. Steinmetz, R., 237 s.
- White, R.S., 1997. Mantle plume origin of the Karoo and Ventersdorp flood basalts, South Africa. I: S. Afr. Jour. Geol., 100, s. 271-282.
- Wholetz, K.H. og Sheridan, M.F., 1979. A model of pyroclastic surge. I: Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 180, s. 177-194.
- Winter, H de la R. og Venter, J.J., 1970. Lithostratigraphic correlation of recent deep boreholes in the Karoo-Cape sequence. I: Second Gondwana Symposium: Proceedings and Papers, Pretoria, Council for Scientific and Industrial Research, s. 395-408.
- Woodford, A.C., et al., 2001. Hydrogeology of the main Karoo Basin. Current knowledge and needs for future research. Water Research Commission Report 860. 340 s.
- Wopfner, H., 1974. Evaluation of hydrocarbon potential of the Karoo Basin. Ikke publisert rapport for Soekor No. SV 136.
- www.redtailcanyon.com/items/311765.aspx?imageid=212713. (Satellittbilde over Sør-Afrika.)

KAPITTEL 10 APPENDIKS

10.0 Appendiks

Dette kapitlet inneholder detaljerte petrografianalyser av 24 prøver, samt en beskrivelse av 27 prøver i håndstykket. De 24 prøvene som er analysert i detalj er analysert ved bruk av sveipe elektronmikroskop (SEM), optisk mikroskop (OM) og røntgendiffraktometri (XRD). Se kapittel 3 for nærmere informasjon om metodene.

Bergartsklassifikasjonen er utført etter diagram av Dott, 1964. Sorteringen er bestemt etter diagram av Compton, 1962. Rundheten til kornene er bestemt etter diagram av Powers, 1953. Dagens porøsitet samt andel matriks er bestemt ved hjelp av "area measurement"-funksjon på SEM. De prøvene som er testet for hastighet er dagens porøsitet målt ved hjelp av laborietorieteknikker på NGI. Se kapittel 3.6 for nærmere informasjon om denne metoden.

Det ble nødvendig med en del forkortelser pga. plassmangel, og disse er følgende:

Kts = kvarts

K-fsp = kalifeltspat

Ab = albitt

Mu = muskovitt

Ru = rutil

Bi = biotitt

-p= påvekst (f.eks. Kts-p = kvartspåvekst)

SEI=sekundær elektron bilde

BSE=tilbakespredte elektron bilde

OM=optisk mikroskop

CL = katodeluminesens

Innhold:

- | | |
|--|--|
| <p>10.1 Ventsandsteiner fra Witkop I</p> <p>10.2 KO1S-40</p> <p>10.3 KO1S-41</p> <p>10.4 KO1S-42</p> <p>10.5 KO1S-30</p> <p>10.6 KO1S-45</p> <p>10.7 KO1S-46</p> <p>10.8 KO1S-48</p> <p>10.9 KO1S-50</p> <p>10.10 KO3HS-27</p> <p>10.11 KO3HS-29</p> <p>10.12 Hastighetsprøver</p> <p>10.13 KO1S-31 (ventsandstein)</p> <p>10.14 KO1S-51(ventsandstein)</p> <p>10.15 KO1S-37 (rød slambergart)</p> <p>10.16 KO1S-3 (kremgul sandstein)</p> <p>10.17 Røde slamsteiner</p> <p>10.18 KO1S-21</p> | <p>10.19 Kremgule sandsteiner</p> <p>10.20 KO1S-1</p> <p>10.21 KO1S-8</p> <p>10.22 KO1S-22</p> <p>10.23 KO1S-32</p> <p>10.24 KO1S-6</p> <p>10.25 KO1S-12</p> <p>10.26 KO1S-26</p> <p>10.27 Prøver fra andre ventkomplekser</p> <p>10.28 KO3HS-25 (Modena I)</p> <p>10.29 KO3HS-26 (Modena II)</p> <p>10.30 Prøvebeskrivelser av andre prøver</p> <p>10.31 Leirmineralogi</p> <p>10.32 Tynnslipsbilder</p> |
|--|--|

10.1 Ventsandsteiner fra Witkop I

De fleste ventsandsteinene er lyse, kremgule og porøse sandsteiner. To av disse sandsteinene ble testet for seismiske hastigheter (kapittel 10.14 og 10.15).

10.2 KOIS-40

Prøve: **KOIS-40**
Litologi: Ventsandstein, kalsittsementert pipe
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoxy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali
Andre analyser enn SEM, CL og XRD: $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en finkornet, porøs og grå sandstein med svarte og gråe soner. Den bruser i kontakt med saltsyre (inneholder kalsitt).

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, plagioklas, kalifeltspat, bergartsfragmenter bestående av kvarts, kalifeltspat og albitt (SEM)

Aksessorier (detriale): apatitt, muskovitt, biotitt, barytt, ilmenitt, titanitt, zirkon, rutil, illitt, kloritt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat (SEM)

Autigene mineraler: Kalsitt, barytt, kvarts, albitt og illitt (SEM og CL) og kloritt (XRD)

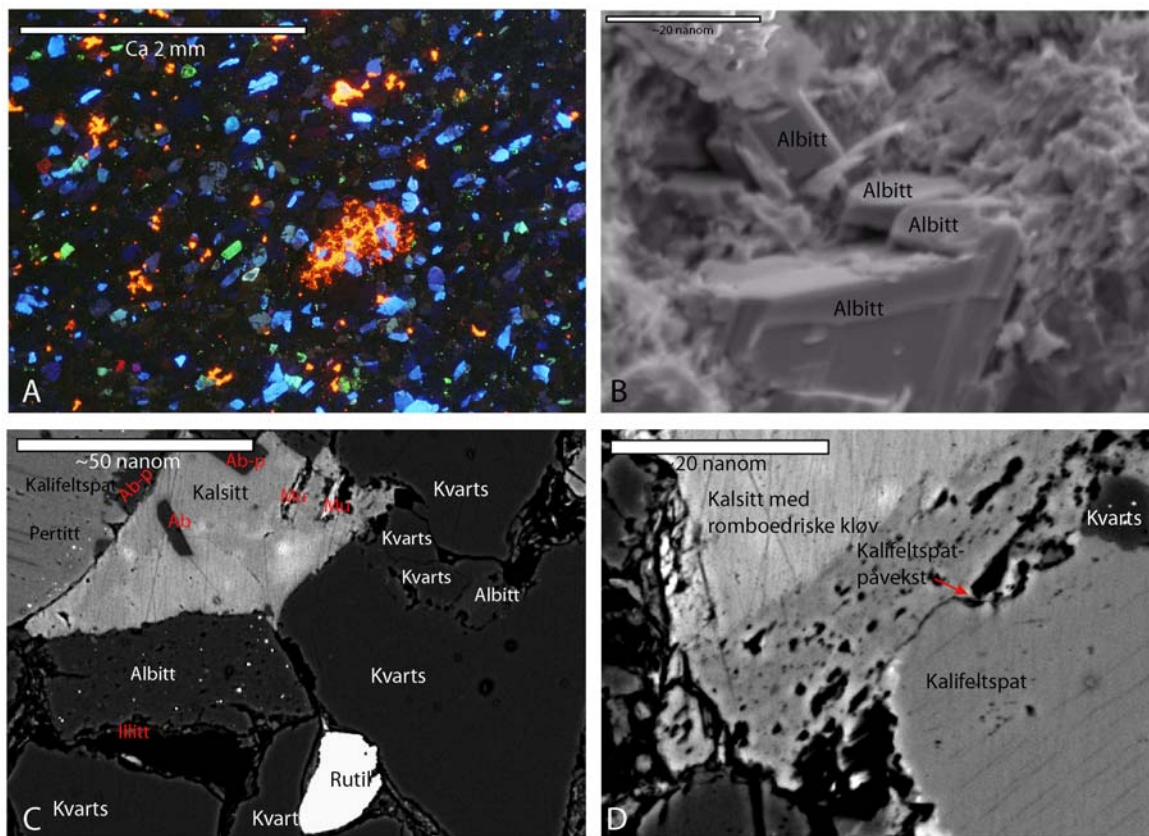
Kornstørrelse: ca. 0,2 mm, grovkornet finsand (SEM)

Rundhet: kantete (SEM)

Porøsitet: ca. 12 % (SEM kartlegging), hvorav det meste er primær porøsitet.

Teksturbeskrivelse (SEM og CL) (figur 10.1):

Denne prøven inneholder lite autigen kalifeltspat. Den autigene kalifeltspaten som er observert opptrer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn. Autigen albitt forekommer som både anhedral og euhedral påvekst på detriale albitt- eller plagioklaskorn og på kalifeltspatkorn. Autigen kvarts forekommer både som euhedrale krystaller og som anhedrale påvekster på detriale kvartskorn. Euhedrale krystaller av kvarts og albitt fyller porerom om hverandre, og har derfor vokst omtrent samtidig. Illitt og kloritt ligger nærmere poreveggen enn kalsittsementen, og predaterer derfor den autigene kalsitten. Autigen kalsitt forekommer som porefyllende sement og har stedvis godt utviklede romboedriske kløv. Kalsittsementen postdaterer albittpåveksten ettersom den omslutter euhedrale albittkrystaller i porerom. Fra CL-studier ser man nyanser i den rødfargede luminesensen som indikerer minst to perioder med utfelling av kalsitt. Kalsittsementen er ikke gjennomgående i hele prøven, men mer tilfeldig fordelt ("patcy calcite"). Autigen barytt opptrer aksessorisk som sement. Det ligger nærmere sentret av poren enn illitt og kloritt, og er derfor en sendiagenetisk fase.

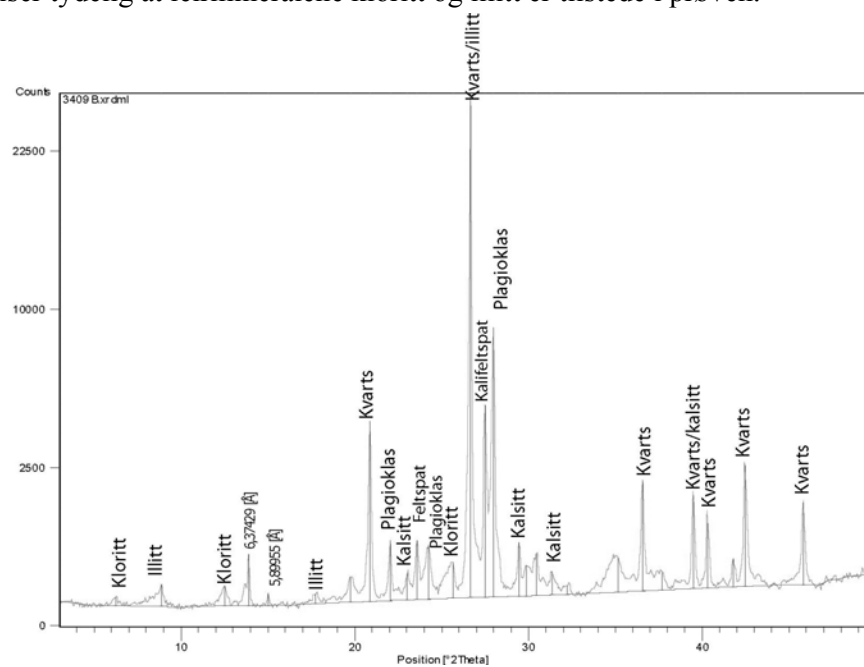


Figur 10.1: Petrografibilder av KOIS-40. **A:** Et CL-bilde fra OM som viser en rød luminisens fra klast av kalsitt samt spredningen av kalsittutfellingene ("patchy calcite"). **B:** SEM-bilde av stubb som viser euhedral vekst av albittkrystaller. **C:** ET BSE-bilde med høy kontrast som viser nyanser i kalsittsementen som indikerer minst to episoder av kalsittutfelling. Euhedrale albittkrystaller tyder på at autigen albitt predaterer kalsittutfellingene. **D:** Et BSE-bilde som viser autigen kalifeltspat rundt et detrialt kalifeltspatkorn.

XRD-analyser:

Det var ikke tilstrekkelig med leirmateriale til å utføre leirmineraldiffraksjons-analyser, men bulkanalysene viser tydelig at leirmineralene kloritt og illitt er tilstede i prøven.

Bulkanalyser:



Toppliste, bulk:

Pos. [°2 θ .]	Høyde [cts]	FWHM [°2 θ .]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2325	38,38	0,3542	14,18157	0,13	Kloritt
8,8802	135,98	0,1771	9,95827	0,48	Illitt
12,4945	118,25	0,2952	7,08458	0,41	Kloritt
13,8933	460,93	0,1771	6,37429	1,61	
15,0175	64,66	0,1771	5,89955	0,23	
17,7295	52,18	0,3542	5,00275	0,18	Illitt
19,7815	183,92	0,2952	4,48820	0,64	
20,8675	4117,53	0,1771	4,25701	14,42	Kvarts
22,0359	663,97	0,1771	4,03385	2,32	Plagioklas
23,0393	203,88	0,1771	3,86040	0,71	Kalsitt
23,5867	665,21	0,1771	3,77203	2,33	Feltspat
24,2477	580,83	0,2362	3,67069	2,03	Plagioklas
25,6358	331,57	0,2362	3,47499	1,16	Kloritt
26,6557	28561,30	0,1771	3,34430	100,00	Kvarts/illitt
27,4994	4793,70	0,1771	3,24358	16,78	Kalifeltspat
27,9694	8779,21	0,1771	3,19013	30,74	Plagioklas
29,4575	609,51	0,1771	3,03228	2,13	Kalsitt
29,8769	274,76	0,2362	2,99066	0,96	
30,4423	412,76	0,2362	2,93640	1,45	
31,3579	193,90	0,1771	2,85272	0,68	Kalsitt
32,2270	64,45	0,3542	2,77774	0,23	
35,1494	343,81	0,4723	2,55320	1,20	
36,5684	1998,61	0,1771	2,45732	7,00	Kvarts
37,7010	154,99	0,4133	2,38607	0,54	
39,4941	1524,50	0,1771	2,28177	5,34	Kvarts/kalsitt
40,3245	911,96	0,1771	2,23668	3,19	Kvarts
41,8187	283,75	0,2362	2,16015	0,99	
42,4792	2413,83	0,1771	2,12808	8,45	Kvarts
45,8232	1345,08	0,2880	1,97863	4,71	Kvarts

10.3 KOIS-41

Prøve: **KOIS-41**
Litologi: Ventsandstein, kalsittsementert pipe
GPS: S: -31 08.575 Ø: 026 36.916
Prepareringstype: Polert tynnsip med blå epoksy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali
 Andre analyser enn SEM, CL og XRD: $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en porøs, lys grå og finkornet sandstein som bruser i kontakt med saltsyre (inneholder kalsitt). Den inneholder klaster av leire som er mørkebrune i farger og lysere klaster som inneholder kalsitt.

Klassifikasjon: arkose (SEM-mapping)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Aksesorier: muskovitt, biotitt, zirkon og apatitt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts og rutil (SEM)

Autigene mineraler: kalifeltspat, albitt, kvarts, kalsitt, illitt, kloritt og små mengder av titanitt, apatitt, barytt, jernoksider og pyritt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle kornkontakter, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: meget kantete (SEM)

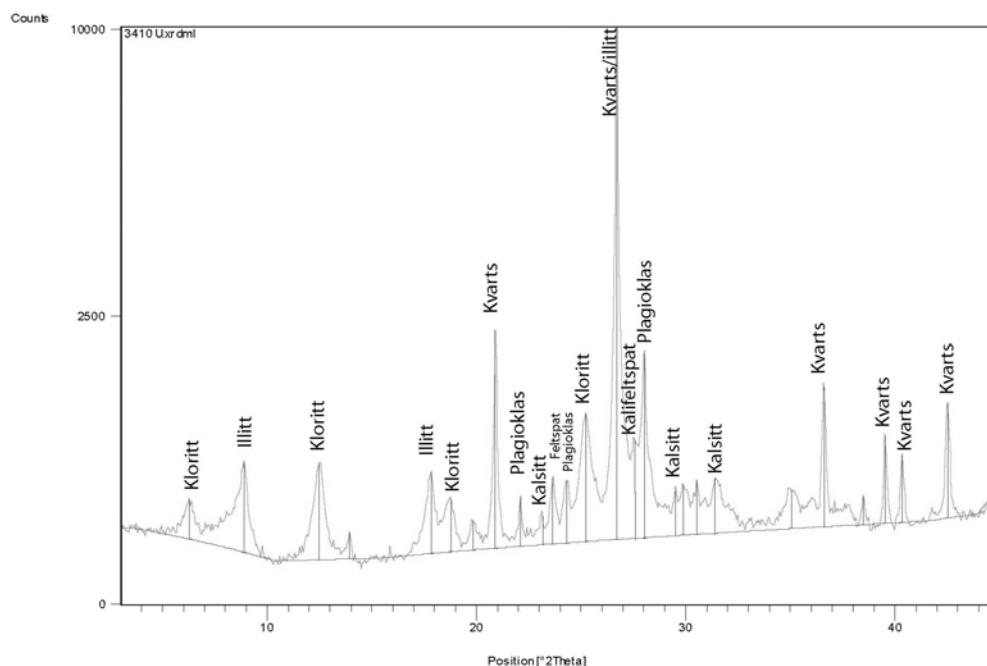
Dagens porøsitet: ca. 12 % (SEM-mapping) som for det meste er primær.

Teksturbeskrivelse (SEM/CL)(figur 10.2):

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på detriale kalifeltspatkorn både med og uten pertittlameller. Autigen kalifeltspat grenser til autigen albitt som har vokst på detriale albittkorn. Mengden av autigen kalifeltspat er meget liten i prøven, og derfor er det vanskelig å si hvorvidt den pre- eller postdaterer den autigene albitten. Dog, det ser ut til at den autigene kalifeltspaten pre-daterer den autigene albitten. I ett tilfelle er det observert at autigen albitt, som virker porefyllende, som har lagt seg helt inntil kanten til kalifeltspat-påveksten. Den autigene kalifeltspaten er en påvekst som ikke virker fullstendig porefyllende, mens den autigene albitten i en mye større grad opptrer som et porefyllende materiale. Autigene euhedrale kvarts- og albittkrystaller fyller vekselvis porerom slik at veksten av disse fasene har pågått omtrent samtidig. Illitt og kloritt opptrer i trådform og ligger som belegg utenfor detriale korn og autigene påvekster av både kalifeltspat, kvarts og albitt. Stedvis er det utfelt kalsitt i porerommene ("patey calcite"). Fra CL-mikroskopet får man bilder som viser at kalsittutfellingen har pågått i minst to episoder. Nyanser i rødfargen (rød og oransje) fra den luminiserende kalsitten er indikasjoner på små forandringer i kjemiske komponenter i kalsitten. (Forsøk på kartlegging av ulike kjemiske komponenter ble utført på SEM, uten noen klare bevis for dette). Ved å øke kontrasten på BSE-bildet på SEM ser man mørkere og lysere nyanser i kalsittsementen, som også indikerer ulike kjemiske sammensetninger i kalsittsementen. Kalsitten har stedvis godt utviklede kløv og fungerer som poikilotopisk sement. Inni kalsittsementen er det observert framboidale pyritt og jernoksider, som enten er vokst samtidig med kalsittutfellingen eller kort tid før eller etter kalsittutfellingen.

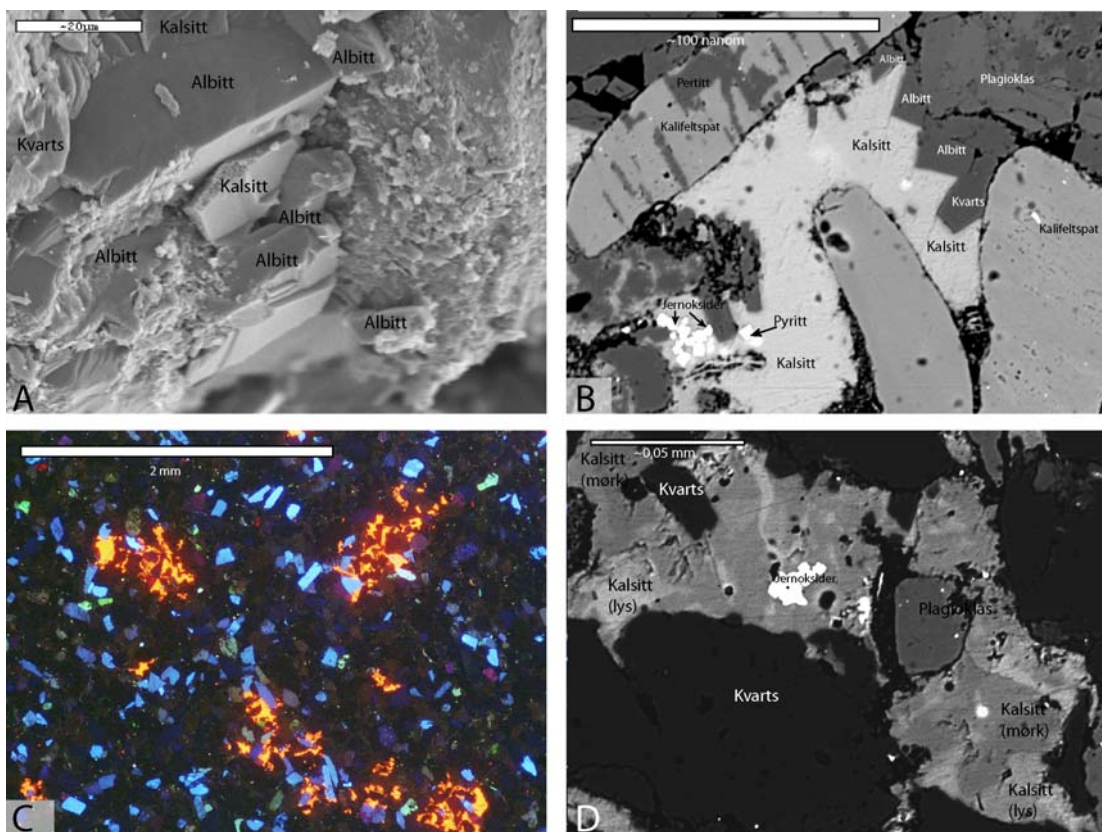
XRD-analyser

Leirmineraldiffraksjon:



Leirmineraldiffraksjon, toppliste:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2676	207,94	0,2952	14,10225	1,95	Kloritt
8,9025	539,45	0,2362	9,93337	5,06	Illitt
12,4976	543,28	0,3542	7,08280	5,10	Kloritt
13,9379	97,40	0,1771	6,35396	0,91	
17,8242	454,76	0,2952	4,97638	4,27	Illitt
18,7886	247,03	0,2952	4,72308	2,32	Kloritt
19,8318	120,95	0,2362	4,47692	1,14	
20,9117	2172,92	0,1771	4,24810	20,40	Kvarts
22,1060	249,89	0,1771	4,02122	2,35	Plagioklas
23,0540	213,88	0,1771	3,85798	0,86	Kalsitt
23,6435	374,67	0,2362	3,76309	3,52	Feltspat
24,3126	345,09	0,2362	3,66102	3,24	Plagioklas
25,2232	987,00	0,2952	3,53089	9,26	Kloritt
26,6986	10653,40	0,1771	3,33902	100,00	Kvarts/illitt
27,4930	2386,67	0,1771	3,24432	9,55	Kalifeltspat
28,0071	1805,55	0,1771	3,18593	16,95	Plagioklas
29,4653	633,49	0,1771	3,03149	2,53	Kalsitt
29,8951	280,86	0,2952	2,98889	2,64	
31,3770	179,75	0,2362	2,85102	0,72	Kalsitt
30,5133	319,61	0,1771	2,92972	3,00	
31,3995	327,80	0,4133	2,84904	3,08	
35,0588	222,36	0,3542	2,55959	2,09	
36,6044	1250,45	0,1771	2,45499	11,74	Kvarts
38,4822	164,49	0,2362	2,33940	1,54	
39,5385	665,74	0,1771	2,27931	6,25	Kvarts
40,3513	480,77	0,1771	2,23525	4,51	Kvarts
42,5155	1001,00	0,2880	2,12459	9,40	Kvarts



Figur 10.2: Petrografibilder fra prøven KOIS-41. **A:** SEI-bilde av stubb som viser hvordan autigene euhedrale albittkrystaller fyller porerom. **B:** BSE-bilde som viser euhedral påvekst av kvarts og albitt om hverandre, og kalsittsementen som fyller porerommet. I tillegg er det framoidale pyritt- og jernoksidutfellinger. **C:** CL-mikroskop bilde som viser stedvis utfellinger av kalsitt ("Patchy calcite") med fargenyanser i luminiseringen til kalsitten. **D:** BSE-bilde med høy kontrast som viser lys og mørk kalsittutfelling.

10.4 KOIS-42

Prøve: **KOIS-42**
Litologi: Finkornet lys grå sandstein
GPS: S: -31 08.574 Ø: 026 36.905
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoksy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali
 Andre analyser enn SEM, CL og XRD: $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en finkornet lysegrå og hvitaktig sandstein med forvitrede hulrom på overflaten. Det er en meget porøs sandstein. Prøven inneholder gråe og hvite klaster, og noen av dem inneholder kalsitt.

Klassifikasjon: arkose (SEM)
Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt, kalifeltspat, bergartsklaster bestående av kvarts, albitt og kalifeltspat (SEM)
Aksesorier (detriale): zirkon, jernoksider, rutil, biotitt, titanitt, ilmenitt, barytt, apatitt (SEM)
Matriks: ca. 5 %, bestående av små korn av kvarts, kalifeltspat og plagioklas (SEM)
Autigene mineraler: kalsitt, kvarts, kalifeltspat, illitt og barytt (SEM)
Kornstørrelse: 0,17 mm, grovkornet finsand (SEM)
Sortering: dårlig sortert (SEM)
Kornkontakt/kompaksjon: flytende, tangentielle og lange kornkontakter, svak-moderat kompaksjon (SEM)
Rundhet: veldig kantete (SEM)
Dagens porøsitet: ca. 10 % (SEM-kartlegging) som for det meste er primær
Forvitring: i stor grad

Klaster:

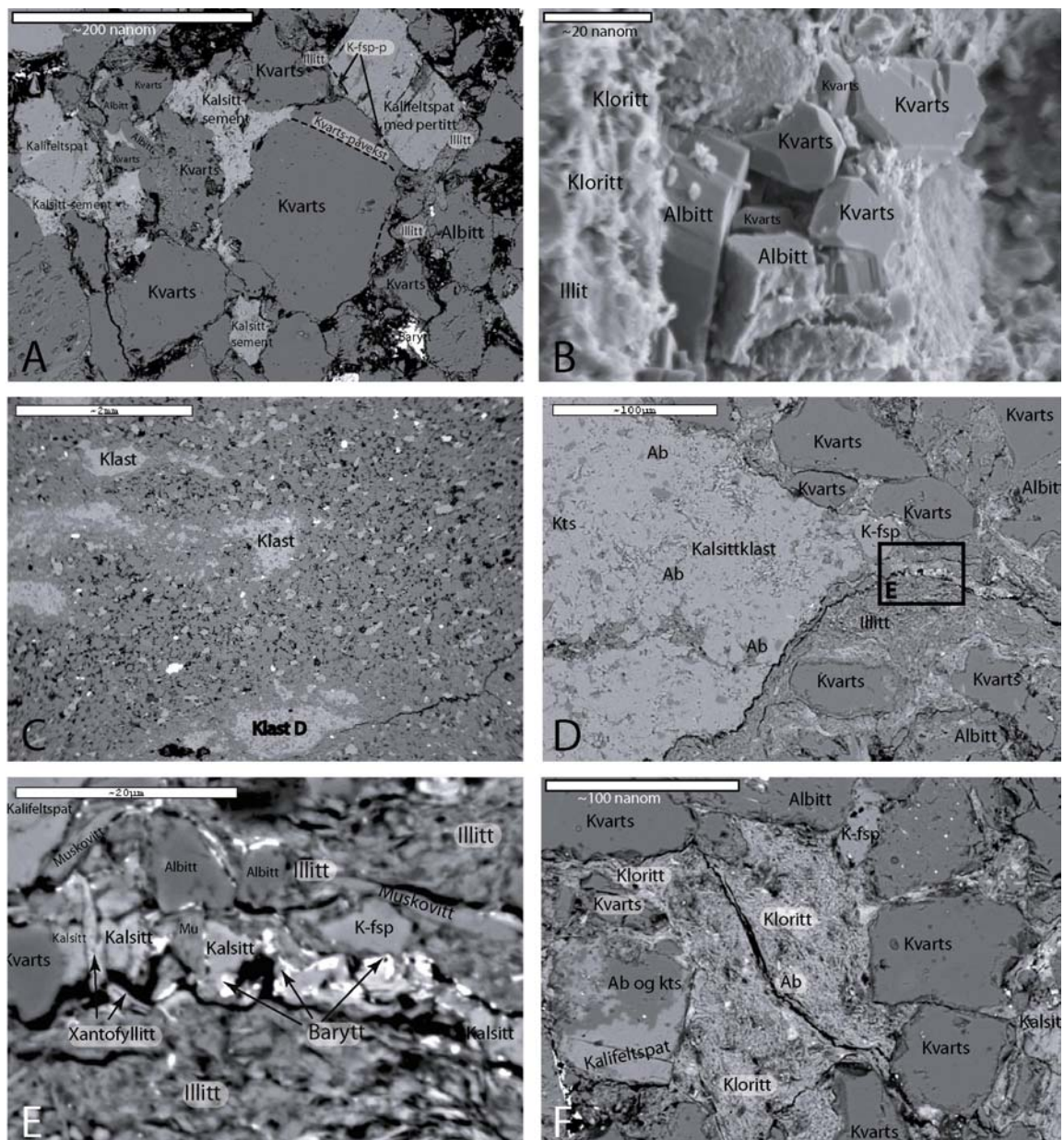
Det er observert to typer klaster i denne prøven. Den ene typen består av kalsitt i matriksen, mens den andre typen består av leirmineraler som illitt og kloritt i matriksen.

Kalsittklast:

Størrelse: 0,5 mm og 1,7 mm (SEM)
Mineraler: kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat (korn opp til 0,1 mm store) (SEM)
Matriks: mikrittisk kalsitt uten utviklede kløv (SEM)
Sortering: veldig dårlig sortert (SEM)
Kornkontakt: flytende, svak kompaksjon (SEM)
Rundhet: veldig kantete (SEM)
 Kalsittklastene er ofte observert med en ytterkant bestående av leirmineraler som kloritt og illitt og rutil, ilmenitt, barytt, biotitt og muskovitt. Autigen albitt er observert på detriale plagioklaskorn som ligger flytende i kalsittmatriksen i en av klastene (SEM).

Leirklast:

Størrelse: 0,2 mm-1,1 mm (SEM)
Mineraler: kvarts, albitt, kalifeltspat (kornstørrelse ca. 0,01 mm) (SEM)
Matriks: mest kloritt, men også illitt (SEM)
Sortering: veldig dårlig sortert (SEM)
Kornkontakt: flytende, svak kompaksjon (SEM)
Rundhet: veldig kantete (SEM)



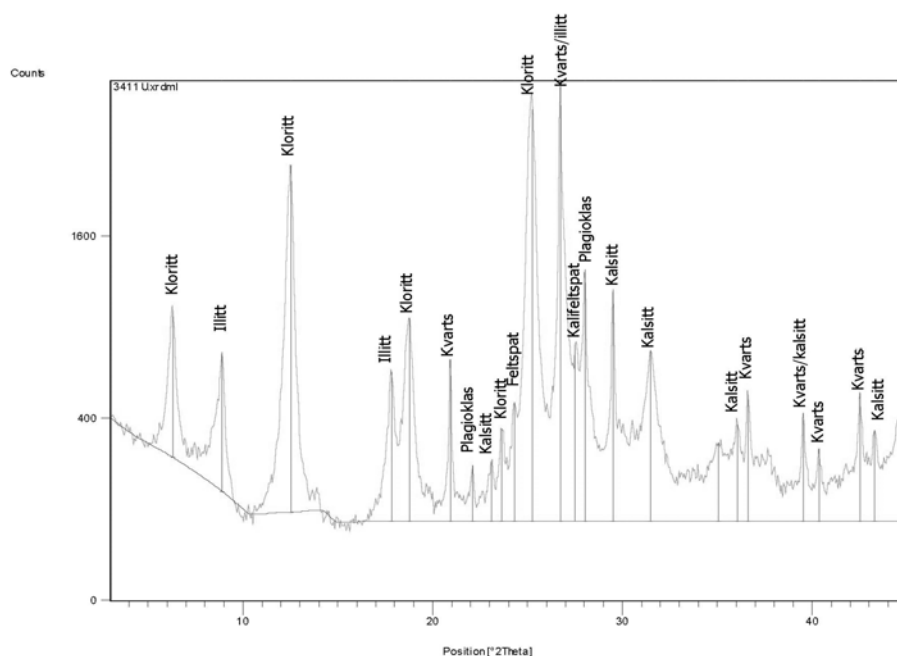
Figur 10.3: SEM-bilder fra prøve KOIS-42. **A:** BSE-bilde som viser de diagenetiske forholdene mellom autigen kvarts, autigen kalifeltspat, illitt og kalsittsement. Den striplete linjen representerer grensen mellom detriale og autigen kvarts, basert på CL-studier på SEM-en. **B:** SEI-bilde som viser hvordan euhedrale krystaller av kvarts og albitt vekselvis fyller porerom. **C:** BSE-bilde som viser lysere områder som representerer kalsittklast. **D:** BSE-bilde av den ene kalsittklasten fra C. Kvarts- og albittkorn ligger flytende i en matriks bestående av mikritt. Klasten grenser mot en sone bestående av leirminerale, muskovitt og biotitt. **E:** Et nærbilde av rammen i D. Dette BSE-bildet viser hvordan barytt er felt ut i en "kanal" som ligger mellom kalsittklasten og den omliggende sonen bestående av leirminerale. Et Ca-holdig glimmermineral som antas å være xantofyllitt er også observert her. **F:** BSE-bilde som viser en klast bestående av kloritt.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.3):

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn med pertittlameller. Autigen kvarts forekommer som påvekst på detriale kvartskorn, og det grenser til autigen kalifeltspat. Autigen kvarts postdateres derfor den autigene kalifeltspaten. Euhedrale krystaller av kvarts og albitt fyller vekselvis porerom, og veksten av disse har derfor pågått omtrent samtidig. Illitt forekommer både som et belegg rundt detriale korn og som et porefyllende

materiale som ligger utenfor den autigene kvartsen og den autigene kalifeltspaten. Autigen illitt postdateres derfor autigen kvarts, albitt og kalifeltspat. Autigen kloritt opptrer sammen med illitt som et belegg rundt detriale korn og rundt kalifeltspatkorn med påvekst av kalifeltspat. Autigen kalsitt er tilfeldig fordelt ("patchy calcite") og forekommer som porefyllende mikrittisk sement uten romboedriske kløv. Kalsittsementen ligger i sentret av poren og grenser til autigen kvarts. Autigen kalsitt postdateres derfor autigen kvarts. Autigen barytt forekommer i en liten mengde som både porefyllende materiale og som belegg på detriale korn av kvarts, albitt og kalifeltspat. Autigen barytt grenser mot en autigen klorittsøm som omringer et detrialt kalifeltspatkorn som siden er blitt oppløst. Autigen barytt er derfor et sendiagenetisk fenomen.

Leirmineral-analyser:



Leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,3098	751,79	0,2952	14,00807	23,49	Kloritt
8,9099	598,35	0,2362	9,92512	18,70	Illitt
12,5174	2187,16	0,3542	7,07167	68,34	Kloritt
17,8337	549,72	0,2362	4,97375	17,18	Illitt
18,7917	884,46	0,3542	4,72231	27,64	Kloritt
20,9364	624,76	0,1771	4,24315	19,52	Kvarst
22,1007	143,62	0,1771	4,02218	4,49	Plagioklas
23,0849	155,58	0,2362	3,85288	4,86	Kalsitt
23,6459	277,86	0,1771	3,76272	8,68	Feltspat
24,3063	397,60	0,1771	3,66197	12,42	Plagioklas
25,2770	2825,81	0,4133	3,52349	88,30	Kloritt
26,7182	3200,41	0,2362	3,33662	100,00	Illitt
28,0055	1238,22	0,1771	3,18611	38,69	Plagioklas
29,5000	1086,73	0,1771	3,02800	33,96	Kalsitt
31,4882	680,88	0,3542	2,84121	21,27	Kalsitt
Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral

35,0533	224,00	0,4723	2,55998	7,00	
36,0692	296,39	0,1771	2,49018	9,26	Kalsitt
36,6266	430,29	0,1771	2,45355	13,44	Kvarts
39,5225	348,36	0,1771	2,28019	10,88	Kvarts
40,3569	201,34	0,2362	2,23495	6,29	Kvarts
42,5234	440,36	0,2362	2,12597	13,76	Kvarts
43,2972	271,70	0,2160	2,08802	8,49	Kalsitt

10.5 KOIS-30

<i>Prøve:</i>	KOIS-30
<i>Litologi:</i>	Ventsandstein
<i>GPS:</i>	S: -31 08.570 Ø: 026 36.941
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul og porøs sandstein uten klaster. Ved å gni litt på prøven ramler noen av sandsteinskornene i prøven av.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, plagioklas, kalifeltspat (SEM)

Aksesorier (detriale): biotitt, muskovitt, rutil (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat (SEM)

Autigene mineraler: kvarts, kalifeltspat, barytt, kloritt, hematitt/gøtitt, illitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,2 mm, grovkornet finsand (SEM)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: subkantete (SEM)

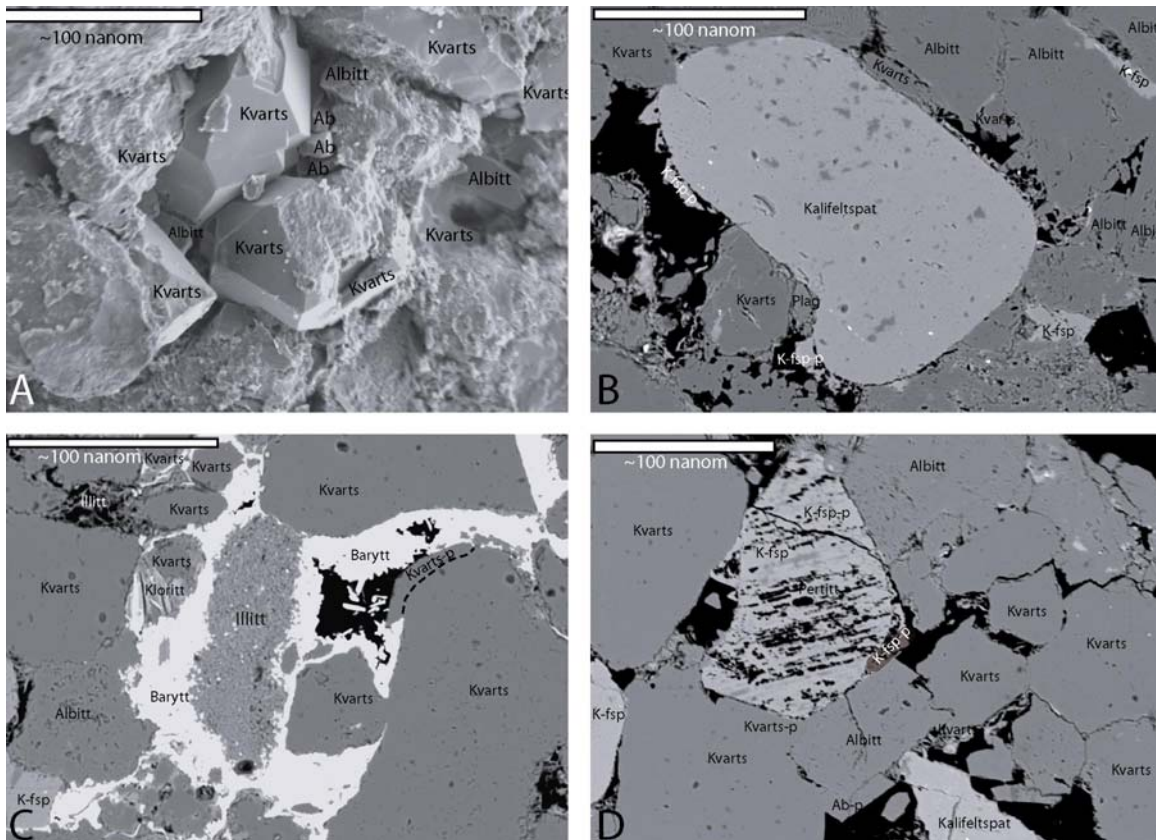
Dagens porøsitet: ca. 15 % (SEM). Det meste av porøsiteten er primær, dog oppløsning av pertittlameller, kalifeltspat, albitt og bergartsfragmenter i noen grad har forårsaket sekundær porøsitet.

Bevaring: Prøven er noe forvitret slik at noen av bevisene for diagentiske forhold er vasket bort.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.4):

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn med delvis oppløste pertittlameller, eller på rene detriale kalifeltspatkorn. Kalifeltspatpåveksten fyller stedvis hele poren. Autigen kalifeltspat er dessverre ikke observert å grense til verken autigen kvarts eller albitt, noe som gjør det vanskelig å si noe om deres diagenetiske forhold. Autigen albitt forekommer som påvekster på detriale albitt- eller plagioklaskorn og danner både anhedrale og euhedrale krystallformer. Autigen kvarts har vokst på detriale kvartskorn og dannet fine euhedrale krystaller. Autigene kvarts- og albittkrystaller fyller porerom vekselvis, noe som indikerer at disse fasene har vokst omtrent samtidig. Autigen illitt forekommer i trådform som et porefyllende materiale som grenser veggen i poren, både til detriale korn bestående av kvarts, albitt og kalifeltspat. Barytt virker som et sementerende og porefyllende materiale som er utfelt i nesten alle kroker og kriker inne i poren. Den autigene barytten ligger mer i sentrale deler av poren utenfor den porefyllende illitten. Autigen barytt er ikke gjennomgående i hele prøven, kun i spredte soner. Autigen barytt er også observert å omringe en sone bestående av illitt. Her er det den autigene barytten som grenser til poreveggen og ikke illitt. Ut av dette oreslås det at illitt også kan ha erstattet tidligere detriale korn som for eksempel kalifeltspat.

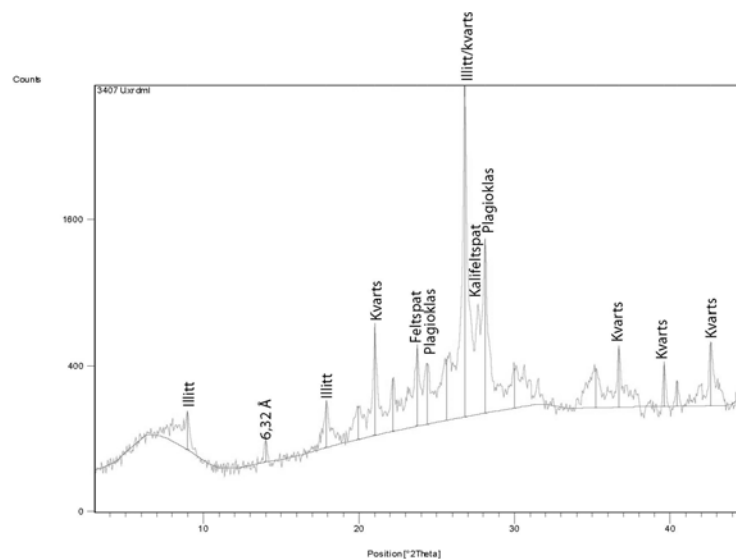
Autigen jernoksid forekommer i ubetydelige små mengder i framboidal form. Illitt postdaterer derfor autigen kvarts og albitt, og autigen barytt postdateres autigen illitt.



Figur 10.4: SEM-bilder av prøve KOIS-30. **A:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale kvarts- og albitt-krystaller som vokser om hverandre i en pore. **B:** BSE-bilde som viser kalifeltspat-påvekster på detriale kalifeltspatkorn. **C:** BSE-bilde som viser baryttsement som fyller en pore. Porefyllende illitt ligger nærmest poreveggen (øverst til venstre). I midten av bildet ses det barytt som omringer en sone med illitt midt i en pore, noe som tyder på at illitt har erstattet et detrialt korn. **D:** BSE-bilde som viser autigen kalifeltspat, kvarts og albitt. Det detriale kalifeltspatkornet inneholder perittlameller som delvis er oppløste.

XRD-analyser:

Leirmineraldiffraksjon:



Leirmineraldiffraksjon, toppliste:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
8,9868	116,36	0,2362	9,84035	3,54	Illitt
14,0085	50,69	0,2362	6,32211	1,54	
17,9248	154,01	0,1771	4,94869	4,68	Illitt
19,9421	111,42	0,4723	4,45242	3,39	
21,0313	559,49	0,2362	4,22421	17,00	Kvarts
22,1772	209,75	0,1771	4,00848	6,37	
23,7324	385,83	0,2362	3,74921	11,72	Feltspat
24,3975	268,02	0,2362	3,64848	8,14	Plagioklas
25,6523	278,84	0,4723	3,47279	8,47	
26,8040	3291,42	0,1771	3,32613	100,00	Illitt/kvarts
28,1083	1212,30	0,1771	3,17469	36,83	Plagioklas
30,0084	179,88	0,3542	2,97786	5,47	
35,2152	185,54	0,4723	2,54859	5,64	
36,7047	311,40	0,1771	2,44851	9,46	Kvarts
39,6264	215,37	0,2362	2,27445	6,54	Kvarts
40,4594	113,89	0,2362	2,22953	3,46	
42,6200	331,05	0,2880	2,11962	10,06	Kvarts

10.6 KOIS-45

Prøve: **KOIS-45**
Litologi: Ventsandstein, Witkop I
GPS: S: -31 08.584 Ø: 026 36.931
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoxy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali

Bergartsbeskrivelse av prøven i håndstykket:

Dette er en finkornet lys kremgul og porøs sandstein med gråe, hvite, brune og hvite irregulære klaster.

Klassifikasjon: arkose (SEM/OM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Aksesorer(detriale): rutil, ilmenitt, biotitt og muskovitt (SEM)

Matrix: ca. 2 %, bestående av små kvartskorn, albittkorn, kalifeltspatkorn og rutil (SEM)

Autigene mineraler: kalifeltspat, albitt, kvarts, illitt (SEM) og kloritt (XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,16 mm, grovkornet finsand (SEM/OP)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle kornkontakter, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: kantete (SEM)

Dagens porøsitet: 12 % (SEM-mapping) hvorav ca. 40 % av dette er sekundær porøsitet grunnet oppløsning av kalifeltspat, pertittlameller og albitt (SEM).

Klast:

Størrelse: ca. 2 mm (SEM)

Mineraler: kvarts, albitt, muskovitt, biotitt, kalifeltspat og rutil (SEM)

Matrix: ca. 50 %, bestående av illitt (SEM)

Kornstørrelse: 0,01 mm-0,05 mm, grovkornet finsilt-grovsilt (SEM)

Sortering: meget dårlig (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende, svak kompaksjon (SEM)

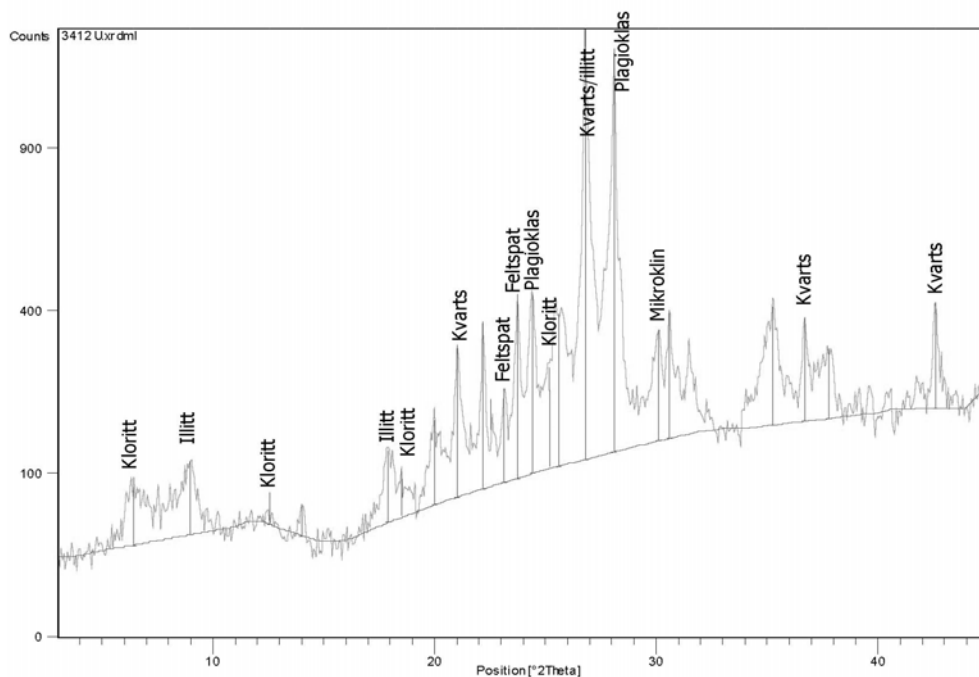
Rundhet: meget kantete (SEM)

Klasten inneholder et kvartskorn som har kvartspåvekst.

XRD-analyser:

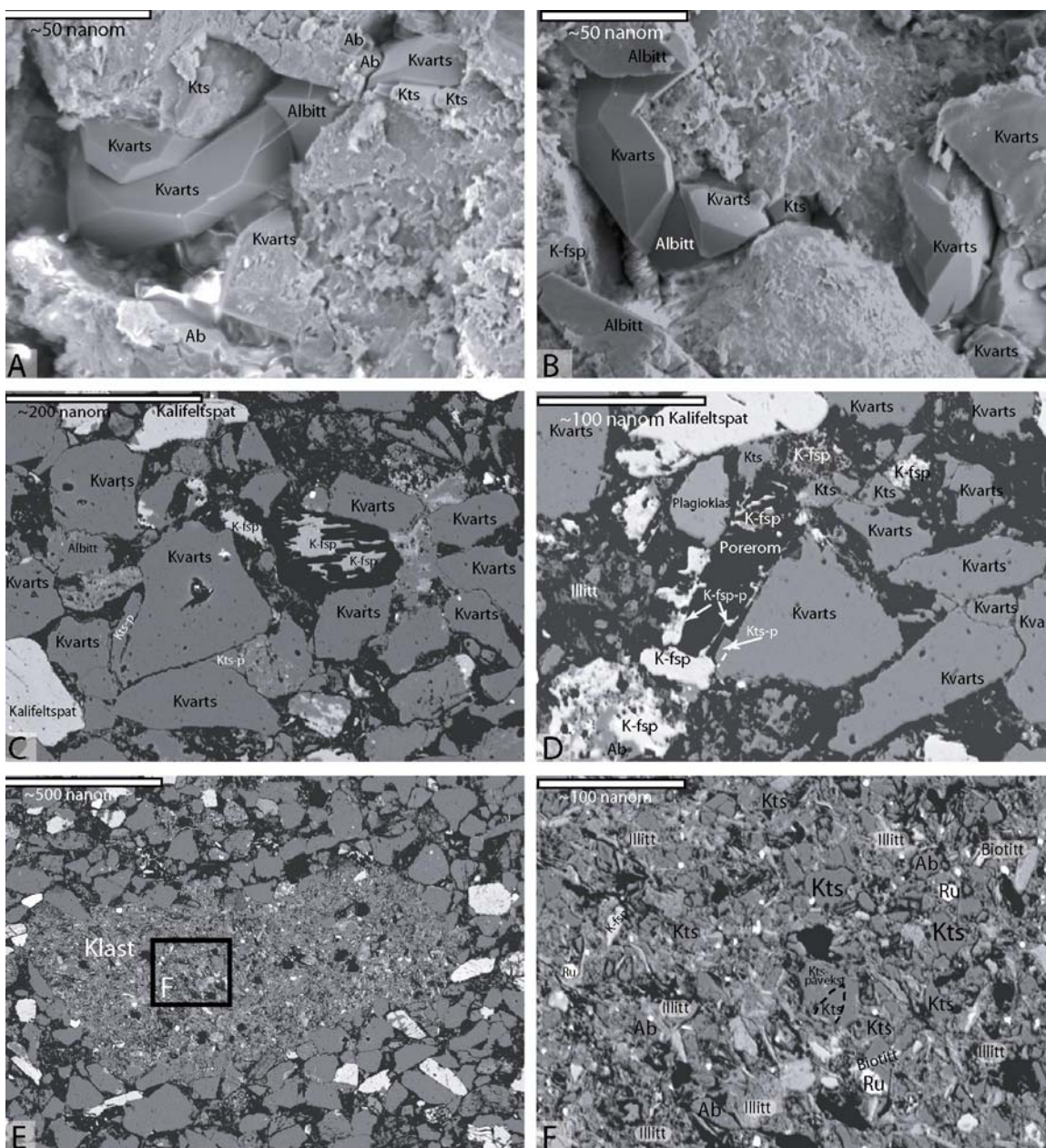
XRD-dataene fra denne prøven er noe ulik fra de andre prøvene. Det viser seg en del topper som ikke lot seg finne ut av. Dette kan muligens forklares utifra forstyrrelser i XRD-målingene.

Leirmineraldiffraksjon:



Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,4456	52,41	0,7085	13,71309	4,12	Kloritt
8,9855	75,24	0,3542	9,84179	5,92	Illitt
12,5627	30,88	0,9328	7,04629	2,43	Kloritt
14,0263	25,78	0,3542	6,31415	2,03	
17,9135	80,66	0,4723	4,95177	6,35	Illitt
19,9774	110,48	0,4723	4,44461	8,69	
21,0271	246,87	0,2362	4,22504	19,42	Kvarst
22,1904	292,08	0,1771	4,00612	22,98	
23,1386	142,44	0,1771	3,84405	11,21	Feltspat
23,7375	347,61	0,1771	3,74841	27,35	Feltspat
24,4246	341,50	0,2362	3,64450	26,87	Plagioklas
25,5969	284,37	0,4723	3,48018	22,37	
26,8088	1270,98	0,2362	3,32554	100,00	Kvarst/illitt
28,0977	1175,01	0,1771	3,17586	92,45	Plagioklas
30,1108	208,68	0,2952	2,96796	16,42	Mikroklin
30,5842	252,18	0,1771	2,92309	19,84	
35,2639	241,78	0,5904	2,54518	19,02	
36,6815	208,92	0,2362	2,45000	16,44	Kvarst
37,7969	133,63	0,3542	2,38023	10,51	Anatas?
42,5935	224,38	0,2160	2,12088	17,65	Kvarst



Figur 10.5: SEM-bilder av prøve KO1S-45. **A** og **B:** SEI-bilde som viser euhedral vekst av kvarts og albitt om hverandre. **C:** BSE-bilde som viser oppløsning av pertittlameller og resterende kalifeltspatkorn, samt kvartspåvekster. **D:** BSE-bilde som viser sekundær porøsitet pga. forvitring. Kun den autigene påveksten av kalifeltspat utgjør poreveggen. **E:** BSE-bilde over en klast som er vist nærmere i F. **F:** BSE-bilde som viser en klast som består av kvarts, albitt, kalifeltspat, rutil, biotitt og illitt.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.5):

Autigen kalifeltspat er det lite av, dog resterende kalifeltspatbelegg er observert å omringe porerom som inneholder litt kalifeltspat. Oppløsningen av kalifeltspat postdaterer dermed det autigene belegget av kalifeltspat, slik at det er dannet sekundær porøsitet. Oppløsning av

pertittlameller danner også sekundær porøsitet. Autigen albitt forekommer som både anhedrale og euhedrale påvekster på detriale albittkorn. Stedvis virker den autigene albitten som et porefyllende materiale. Autigen kvarts er også observert som både anhedrale og euhedrale påvekster på detriale kvartskorn. Euhedrale kvarts- og albittkrystaller er observert å fylle porerom om hverandre og har derfor vokst syntaksialt. Autigen illitt forekommer i trådform både som et belegg rundt detriale og autigene faser av kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat og som et porefyllende materiale. Autigen kloritt er ikke observert på SEM, men XRD-dataene viser at kloritt er tilstede i prøven.

10.7 KOIS-46

<i>Prøve:</i>	KOIS-46
<i>Litologi:</i>	Ventsandstein, Witkop I
<i>GPS:</i>	S: -31 08.585 Ø: 026 36.931
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoxy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Bergartsbeskrivelse av prøven i håndstykket:

Dette er en finkornet lys kremgul og porøs sandstein med stjerneformede områder med noe svart og brunt materiale. Det ser mer ut som utfellinger fremfor klaster. Denne prøven har en forvitringsoverflate, og ca. 3 cm under denne overflaten er det en sone med noe skinnende materiale.

Klassifikasjon: arkose (SEM/OM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Aksesorier (detriale): rutil (SEM)

Matrix: ca. 2 %, bestående av små kvartskorn, albittkorn og kalifeltspatkorn (SEM)

Autigene mineraler: kalifeltspat, albitt, kvarts, illitt (SEM) og kloritt (XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,22 mm, grovkornet finsand (SEM/OP)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle kornkontakter, svak kompaksjon (SEM)

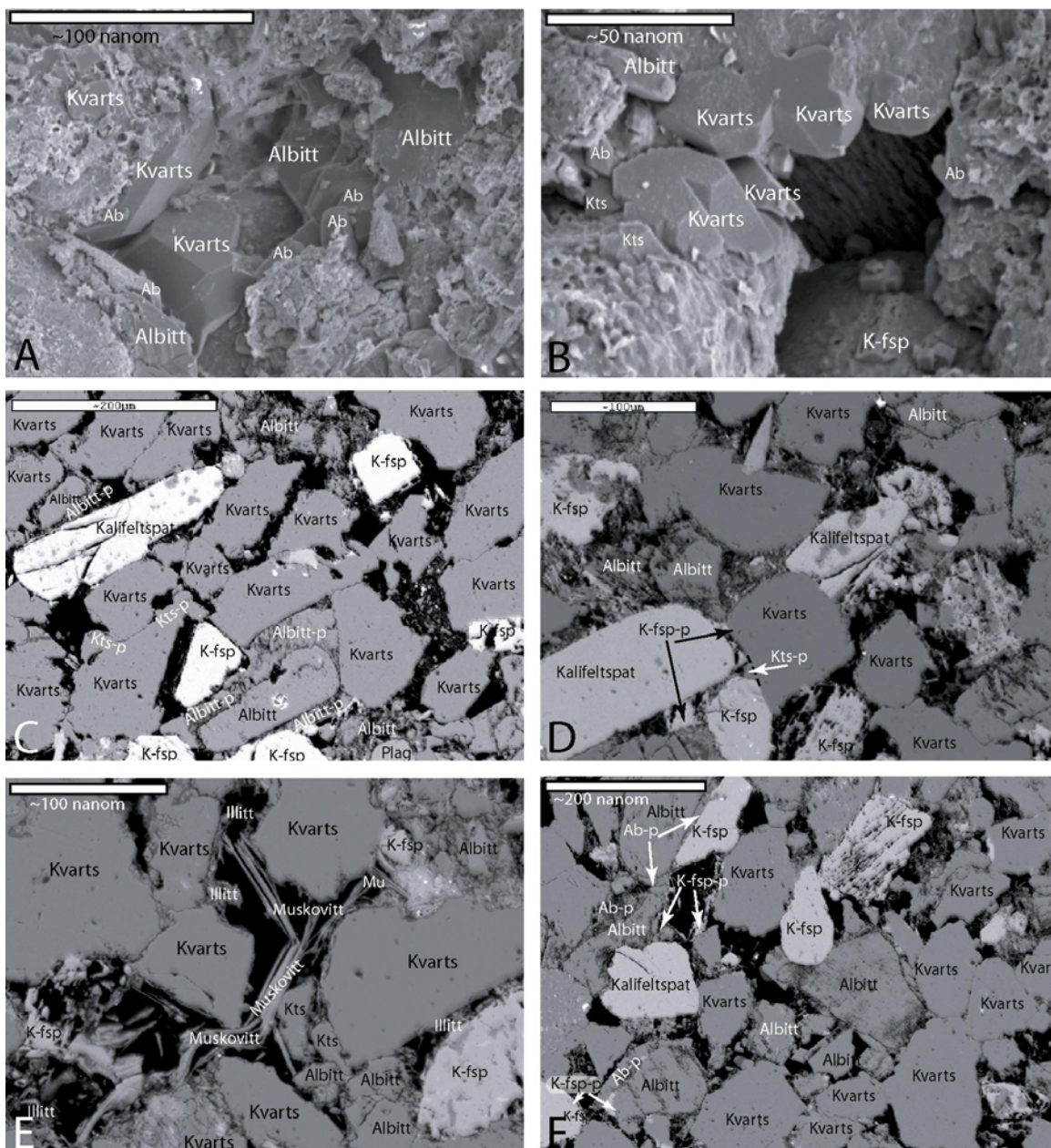
Rundhet: kantete (SEM)

Dagens porøsitet: 13 % (SEM-mapping) hvorav ca. 50 % av dette er sekundær porøsitet grunnet oppløsning av kalifeltspat, pertittlameller og albitt (SEM).

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.6):

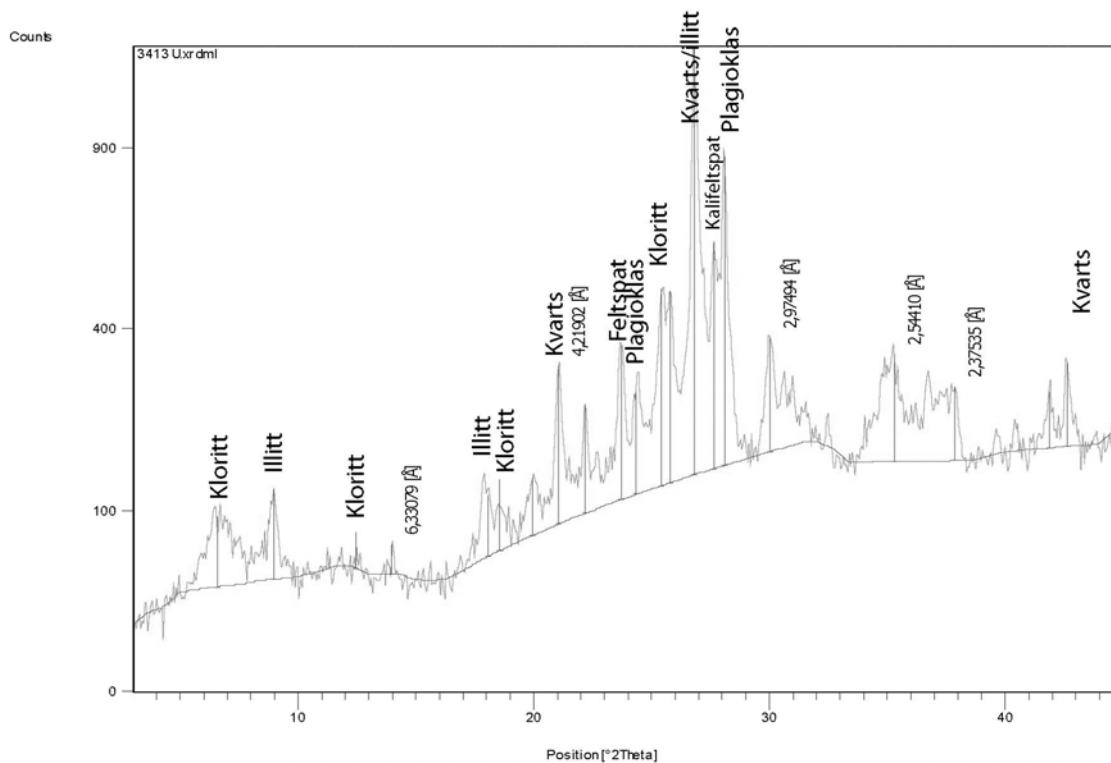
Autigen kalifeltspat forekommer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn. En plass er autigen kalifeltspat observert å ligge rundt et detrialt albittkorn. Dette albittkornet er også omgitt av autigen albitt som også omslutter den autigene kalifeltspaten. Autigen albitt postdateres dermed den autigene kalifeltspaten. Autigen kvarts forekommer som påvekst på detriale kvartskorn og er også observert å omslutte autigen kalifeltspat. Autigen kalifeltspat predaterer dermed den autigene kvartspåveksten. Autigen kvarts forekommer også som euhedrale krystaller som vekselvis fyller porerom sammen med euhedrale krystaller av albitt. Den autigene veksten av kvarts og albitt har derfor pågått omtrent samtidig. Autigen albitt er også observert å virke som et porefyllende materiale og som et belegg rundt detriale korn av albitt og plagioklas. Autigen illitt forekommer i trådform som et belegg rundt detriale og autigene korn av kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat. Stedvis er det observert illitt som omringer porerom som inneholder litt resteredene kalifeltspat. Oppløsning av kalifeltspat postdateres dermed veksten av autigen illitt slik at det er dannet sekundær porøsitet. Autigen kloritt er

ikke observert på SEM, men utifra XRD-dataene skal kloritt være tilstede i prøven. Oppløsning av albitt har forårsaket noe sekundær porøsitet. Det er i hovedsak den autigene påveksten som har vært mest utsatt for oppløsningen.



Figur 10.6: Petrografibilder av prøve KO1S-46. **A:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale kvartskrystaller sammen med euhedrale krystaller av albitt. **B:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale krystallformer av kvarts og albitt **C:** BSE-bilde som viser hvordan autigen albitt opptrer som et porefyllende materiale. **D:** BSE-bilde som viser hvordan autigen kalifeltspat har vokst på et detrialt kalifeltspatkorn blir omsluttet av autigen kvarts. **E:** BSE-bilde som viser hvordan muskovitt spriker seg ut i et porerom. **F:** BSE-bilde som viser autigen kalifeltspat på et detrialt albittkorn (nederst til venstre) som blir omringet av autigen albitt. Bildet viser også hvordan sekundær porøsitet er blitt dannet etter oppløsning av kalifeltspat som først hadde blitt omringet av et belegg av autigen kalifeltspat.

XRD-analyser:
Leirmineraldiffraksjon:



Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,6006	60,33	0,9446	13,39144	5,32	Kloritt
8,9672	87,07	0,2362	9,86182	7,68	Illitt
12,4500	30,70	0,0200	7,10979	2,71	Kloritt
13,9892	22,98	1,3415	6,33079	2,03	
18,0664	60,79	0,7085	4,91021	5,36	Illitt
18,5546	77,06	0,3000	4,78212	6,80	Kloritt
19,9610	64,39	0,4723	4,44824	5,68	
21,0575	235,73	0,2362	4,21902	20,80	Kvarts
22,1997	154,72	0,1771	4,00446	13,65	
23,7193	251,45	0,2362	3,75124	22,19	Feltspat
24,3559	154,78	0,2362	3,65462	13,66	Plagioklas
25,4279	363,69	0,2362	3,50293	32,09	
25,7898	356,36	0,1771	3,45459	31,45	
26,8042	1133,25	0,2362	3,32611	100,00	Kvarts/illitt
27,6393	464,45	0,1771	3,22748	40,98	Kalifeltspat
28,1001	712,89	0,1771	3,17560	62,91	Plagioklas
30,0385	203,21	0,2362	2,97494	17,93	
35,2793	184,46	0,7085	2,54410	16,28	
37,8775	118,25	0,4723	2,37535	10,43	
41,8876	90,52	0,3542	2,15676	7,99	
42,6294	143,46	0,2160	2,11917	12,66	Kvarts

10.8 KOIS-48

<i>Prøve:</i>	KOIS-48
<i>Litologi:</i>	Ventsandstein, Witkop I
<i>GPS:</i>	S: -31 08.576 Ø: 026 36.931
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul og porøs sandstein uten klaster. Prøven har en grov forvitningsflate som skinner i sollys.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, plagioklas, kalifeltspat (SEM)

Aksesorier (detriale): muskovitt, biotitt, rutil, zirkon, jernoksider og zirkon (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat (SEM)

Autigene mineraler: kvarts, kalifeltspat, albitt, illitt (SEM) og kloritt (XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,25 mm, grovkornet finsand (SEM)

Sortering: god (SEM)

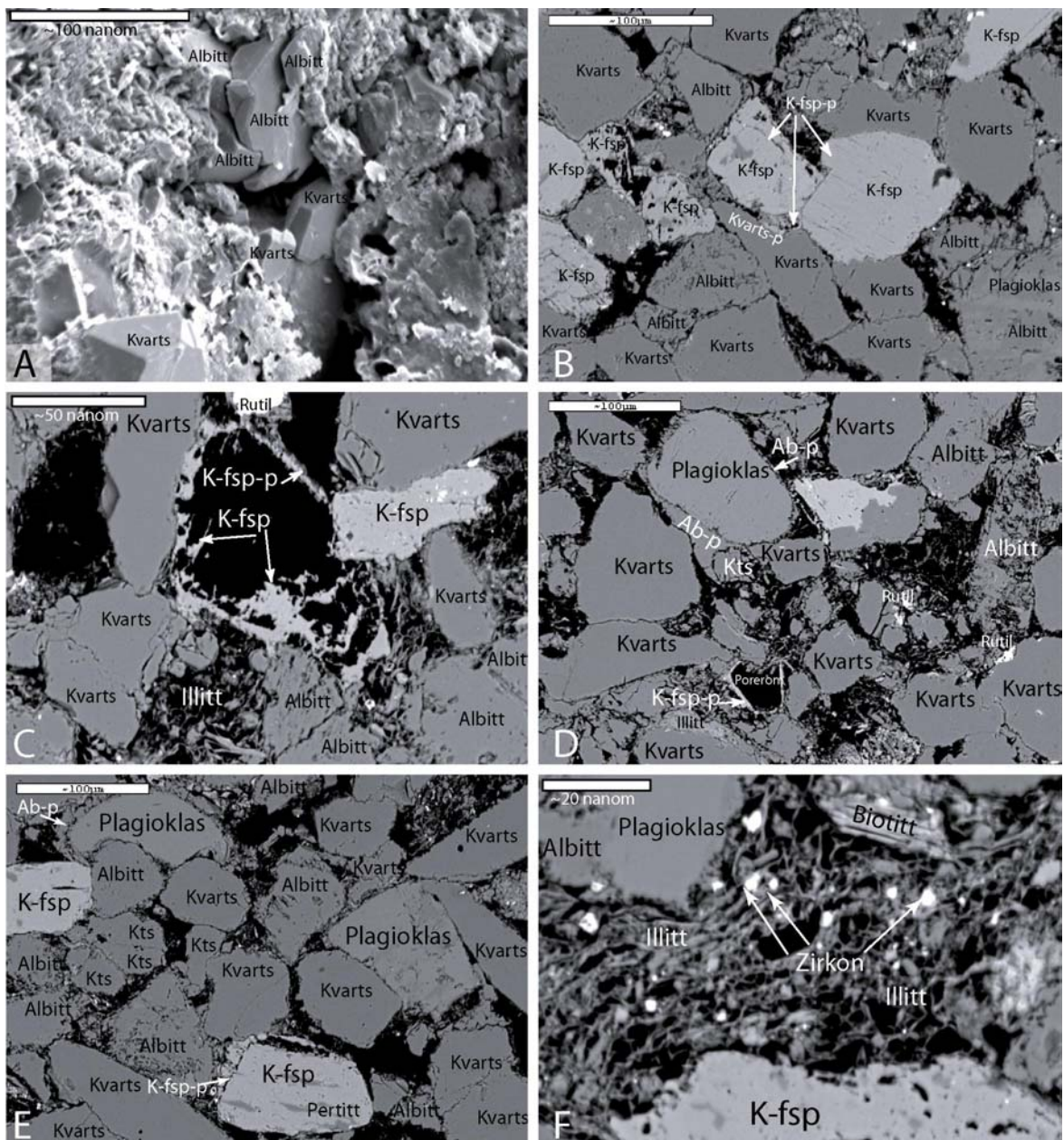
Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: subrundet (SEM)

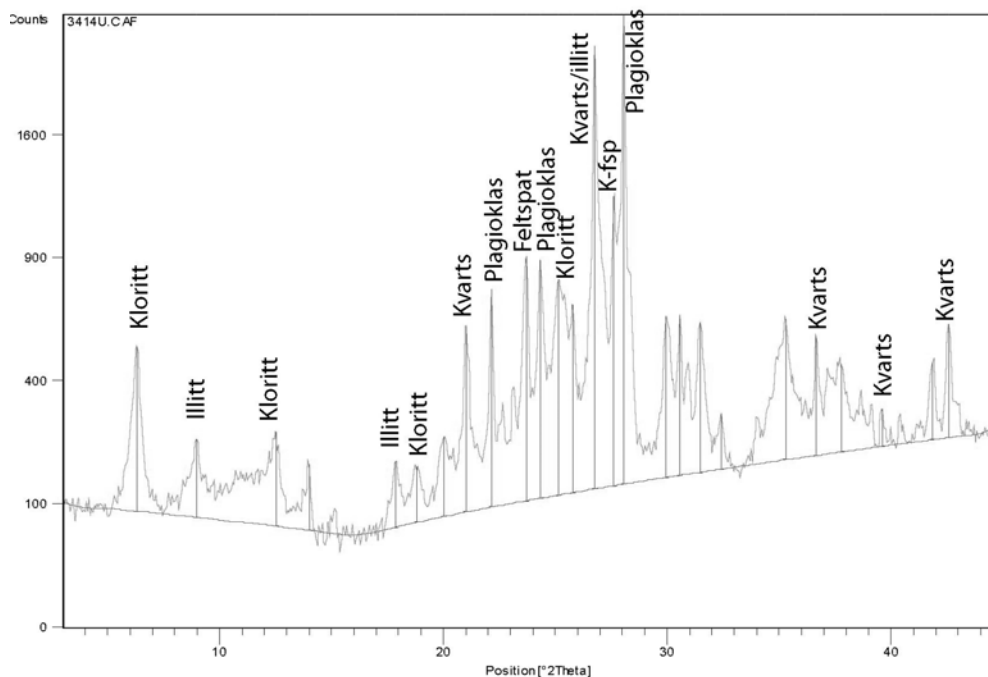
Dagens porøsitet: Ca. 12 % (SEM). Det meste av porøsiteten er primær, dog oppløsning av i hovedsak albitt og også kalifeltspat og kvarts i noen grad har forårsaket sekundær porøsitet.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.7):

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på detriale kalifeltspatkorn, både de med og uten pertittlameller. Stedvis er den autigene kalifeltspaten som et belegg rundt de detriale kalifeltspatkornene, mens andre steder er den mer porefyllende. Det er observert flere porevegger som består av et kalifeltspatbelegg, og inni poren er det resterende kalifeltspat. Det tyder på at oppløsningen av kalifeltspat postdater utfellingen av kalifeltspaten. Autigen kvarts forekommer som euhedrale påvekster på detriale kvartskorn. Kvartspåvekstene kan også virke som et porefyllende materiale. Den porefyllende varianten er observert å omslutte både detriale og autigene faser av kalifeltspat. Kvartspåvekstene postdaterer derfor den autigene veksten av kalifeltspat. Euhedrale krystaller av kvarts ligger sammen med euhedrale krystaller av albitt, noe som tyder på at veksten av disse autigene fasene har pågått omtrent syntaksialt. Autigen illitt forekommer i trådform som et porefyllende materiale som grenser til både detriale og autigene faser av albitt, kvarts og kalifeltspat. Autigen illitt postdaterer dermed de andre autigene fasene. Det er observert flere zirkonmineraler blant den porefyllende illitten. Det er mulig at dette mineralet ble felt ut samtidig med illitten.



Figur 10.7: SEM-bilder av prøve KO1S-48. **A:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale krystaller av kvarts og albitt om hverandre i porerom. **B:** BSE-bilde som viser de diagenetiske forholdene mellom autigen kalifeltspat og autigen kvarts. **C:** BSE-bilde som viser hvordan sekundær porøsitet er dannet ved oppløsning av kalifeltspat. **D:** BSE-bilde som viser albittpåvekst og sekundær porøsitet som følge av oppløsning av kalifeltspat. **E:** BSE-bilde som viser autigene påvekster av albitt og kalifeltspat. **F:** BSE-bilde som viser hvordan trådformet illitt fyller porene. Det viser også hvordan zirkon-mineraler ligger i illittfyllet.

XRD-analyser:**Leirmineraldiffraksjon:****Toppliste, leirmineraldiffraksjon:**

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,3152	430,03	0,2952	13,99599	18,27	Kloritt
8,9848	152,85	0,1771	9,84257	6,49	Illitt
12,5187	183,41	0,2362	7,07094	7,79	Kloritt
14,0040	111,28	0,1771	6,32413	4,73	
17,8539	114,41	0,1771	4,96816	4,86	Illitt
18,8258	95,67	0,3542	4,71382	4,06	Kloritt
20,0457	158,62	0,3542	4,42962	6,74	
21,0321	510,14	0,1771	4,22405	21,67	Kvarst
22,1534	657,12	0,1771	4,01273	27,92	Plagioklas
23,6886	802,05	0,2362	3,75604	34,07	Feltspat
24,3472	778,38	0,2362	3,65591	33,07	Plagioklas
25,1346	681,35	0,2952	3,54313	28,95	Kloritt
25,7895	565,28	0,1771	3,45463	24,01	
26,7661	2104,51	0,1771	3,33075	89,41	Kvarst/illitt
27,6117	1087,83	0,1771	3,23065	46,21	Kalifeltspat
28,0612	2353,90	0,1771	3,17991	100,00	Plagioklas
29,9708	488,71	0,2952	2,98151	20,76	
30,5602	486,62	0,1181	2,92534	20,67	
31,4650	453,57	0,2362	2,84325	19,27	
32,4323	136,30	0,2362	2,76062	5,79	
35,2977	440,91	0,1771	2,54282	18,73	
36,6663	359,57	0,1771	2,45099	15,28	Kvarst
37,7795	253,17	0,3542	2,38129	10,76	
39,6056	98,37	0,1771	2,27560	4,18	Kvarst
41,8549	229,49	0,2362	2,15836	9,75	
42,5728	367,51	0,2880	2,12186	15,61	Kvarst

10.9 KOIS-50

<i>Prøve:</i>	KOIS-50
<i>Litologi:</i>	Ventsandstein, Witkop I
<i>GPS:</i>	S: -31 08.570 S: 026.36.946
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Bergartsbeskrivelse av prøven i håndstykket:

Dette er en finkornet lys kremgul, hvit og porøs sandstein. Den har en grov og glinsende forvitringsoverflate. Prøven inneholde spredte soner med noe brunere materiale.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Aksessorier (detriale): rutil, biotitt og muskovitt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små kvartskorn og rutil (SEM)

Autigene mineraler: albitt, kvarts, kalifeltspat, illitt og kloritt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,2 mm, grovkornet finsand (SEM)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende, tangentielle og lange kornkontakter. Svak kompaksjon. (SEM)

Rundhet: kantete (SEM)

Dagens porøsitet: 12 % (SEM-kartlegging), det meste er primær, men også noe sekundær porøsitet pga. oppløsning av albitt.

Klast:

Størrelse: ca. 3,8 mm lang og 1,2 mm bred (SEM)

Mineraler: kvarts, albitt, biotitt, kalifeltspat og rutil (SEM)

Matrix: ca. 50 %, bestående av illitt (SEM)

Kornstørrelse: 0,01 mm-0,08 mm, grovkornet finsilt-finkornet finsand (SEM)

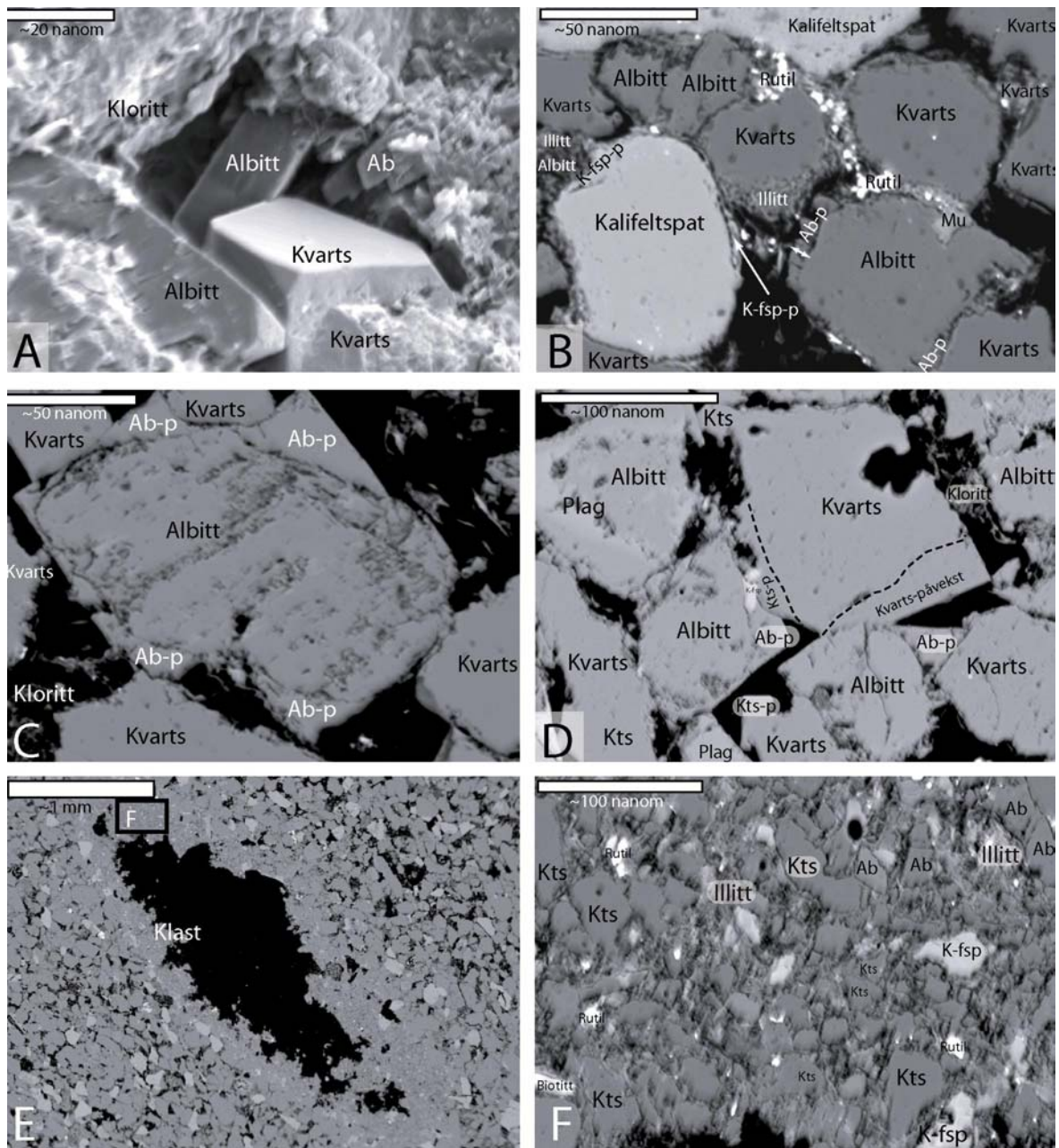
Sortering: meget dårlig (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende, svak kompaksjon (SEM)

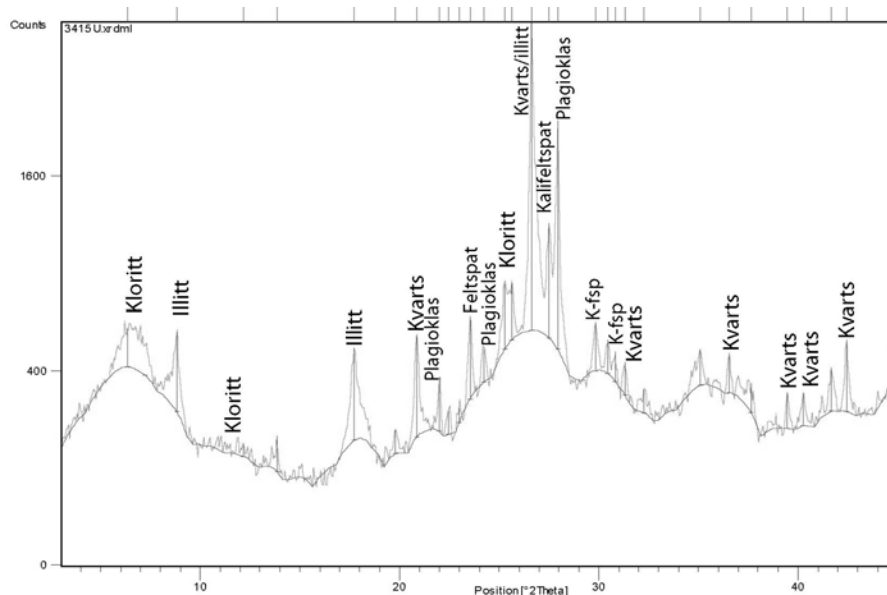
Rundhet: meget kantete (SEM)

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.8):

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på detriale kalifeltspatkorn. Den autigene kalifeltspaten grenser både til et detrialt albittkorn samt albittkornets albittpåvekst. Autigen kalifeltspat predaterer dermed den autigene albitten. Autigen albitt forekommer som påvekster på detriale albitt- eller plagioklaskorn, både som et porefyllende materiale og som euhedrale krystallformer. Euhedrale former av albitt ligger vekselvis sammen med euhedrale former av kvarts i porerom. Veksten av autigen kvarts og albitt har derfor pågått omtrent samtidig. Anhedrale kvartspåvekster på detriale kvartskorn er også observert basert på CL-studier på SEM. Autigen illitt opptrer i trådform som et belegg på detriale kalifeltspatkorn. Stedvis har detriale kalifeltspatkorn blitt oppløst slik at sekundær porøsitet er dannet. Trådformet illitt opptrer også som et porefyllende materiale. Autigen kloritt forekommer i trådform som et porefyllende materiale og i mer sentrale deler av porerommet, og det grenser gjerne mot illittbelegget som ligger rundt de detriale korna. Dermed postdateres autigen kloritt muligens autigen illitt, eller så har de to fasene blitt utfelt omtrent samtidig.



Figur 10.8: SEM-bilder av prøve KO1S-50. **A:** SEI-bilde som viser euhedrale krystaller av kvarts og albitt som om hverandre fyller et porerom. **B:** BSE-bilde som viser både autigen kalifeltspat og autigen albitt. **C:** BSE-bilde som viser euhedral påvekst av albitt på et detrialt albittkorn. **D:** BSE-bilde som viser euhedral påvekst av både kvarts og albitt. Den striplete linjen representerer grensen mellom autigen og detrialt kvarts, basert på CL-studier. **E:** BSE-bilde som viser en klast. Klasten er noe oppløst, sannsynligvis under prepareringen av tynnslipet. **F:** BSE-bilde fra klasten i E. Klasten inneholder kantete korn av kvarts, albitt og kalifeltspat, samt biotitt og rutil. Matriksen består av illitt.

XRD-analyser:**Leirmineraldiffraksjon:****Toppliste, leirmineraldiffraksjon:**

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6.3522	174.54	0.9446	13.91446	6.63	Kloritt
8.8064	326.65	0.1771	10.04156	12.40	Illitt
12.1524	24.80	0.4723	7.28321	0.94	Kloritt
13.8439	81.55	0.1771	6.39692	3.10	
17.7139	330.80	0.2362	5.00711	12.56	Illitt
19.8138	62.54	0.1771	4.48094	2.37	
20.8707	382.76	0.1771	4.25637	14.53	Kwarts
22.0050	185.93	0.1771	4.03945	7.06	Plagioklas
22.4670	67.93	0.1771	3.95742	2.58	
22.9943	44.75	0.1771	3.86785	1.70	
23.5446	343.02	0.2362	3.77868	13.02	Feltspat
24.2272	136.62	0.2362	3.67374	5.19	Plagioklas
25.2811	337.42	0.1771	3.52293	12.81	Kloritt
25.6547	299.27	0.1771	3.47247	11.36	
26.6286	2633.99	0.1771	3.34764	100.00	Kwarts/illitt
27.4936	687.97	0.1771	3.24425	26.12	Kalifeltspat
27.9305	1591.41	0.1771	3.19449	60.42	Plagioklas
29.8331	223.09	0.2362	2.99495	8.47	Kalifeltspat
30.4411	150.42	0.1771	2.93651	5.71	
30.8178	124.88	0.1771	2.90147	4.74	Kalifeltspat
31.3022	128.53	0.1771	2.85766	4.88	Kwarts
32.2708	80.23	0.3542	2.77407	3.05	
35.0921	149.17	0.1771	2.55724	5.66	
36.5478	162.01	0.1771	2.45866	6.15	Kwarts
37.6304	102.69	0.2362	2.39038	3.90	
39.4660	118.71	0.1771	2.28333	4.51	Kwarts
40.2629	106.78	0.1771	2.23996	4.05	Kwarts
41.6746	162.03	0.2952	2.16728	6.15	
42.4401	288.32	0.2160	2.12819	10.95	Kwarts

10.10 KO3HS-27

<i>Prøve:</i>	KO3HS-27
<i>Litologi:</i>	Ventsandstein, Witkop I (Prøven er hentet fra en tverrgang av breksje).
<i>GPS:</i>	S: -31 08'33.13661 Ø: 26 36' 55.837528
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoxy
<i>Innsamlet av:</i>	Henrik Svensen
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Bergartsbeskrivelse av prøven i håndstykket:

Dette er en sandstein som består av mange ulike kantete klaster. Klastene kan være mellom 0,2 cm til 2,0 cm lange. Klastene har varierende farger fra grå-berse, hvite, grå og brune. Grunnmassen består av kremgul finkornet sandstein. Prøven inneholder også områder med noe svart materiale som ser ut som utfellinger.

Klassifikasjon: brekjsje-tverrgang (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Aksessorier (detritale): rutil, ilmenitt, zirkon, jernoksider og muskovitt (SEM)

Matrix: ca. 6 %, bestående av små kvartskorn, albittkorn og kalifeltspatkorn (SEM)

Autigene mineraler: albitt, kvarts, kloritt, illitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 1,0 mm, grovkornet grovsand (SEM/OP)

Sortering: veldig dårlig sortert (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle kornkontakter, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: kantete (SEM)

Dagens porøsitet: ca. 12 % (SEM-mapping), der det meste er primær porøsitet. Noe sekundær porøsitet er dannet som følge av oppløsning av kalifeltspat.

Bergarten inneholder tre typer av fragmenter. Den ene typen består av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat som ligger flytende i en matriks (ca. 90 %) bestående hovedsaklig av illitt og biotitt. Denne typen forekommer hyppigst. Den andre typen består også av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat som ligger flytende i en matriks bestående av illitt og biotitt. I denne typen er matriksandelen mindre, ca. 50%. Den tredje typen består nesten kun av små korn av albitt. I tillegg til albitt forekommer det, i et lite antall, korn av kalifeltspat og kvarts.

Fragment 1:

Størrelse: 1,4 mm (SEM)

Korn: kvarts, albitt, kalifeltspat og biotitt (SEM)

Matriks: ca. 90 %, bestående av illitt og biotitt (SEM)

Kornstørrelse: 0,05 mm, grovsilt (SEM)

Sortering: meget dårlig (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende kornkontakter, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: subrundet (SEM)

Fragment 2:

Størrelse: ca. 1,0 mm (SEM)

Korn: plagioklas, kvarts, albitt, biotitt, muskovitt, ilmenitt og rutil (SEM)

Matriks: ca. 50 %, bestående av illitt og biotitt (SEM)

Kornstørrelse: 0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: subrundet (SEM)

Fragment 3:

Størrelse: ca. 3,7 mm (SEM)

Korn: albitt (95 %), biotitt, muskovitt, kalifeltspat og kvarts (SEM)

Matriks: små korn av albitt og noe illitt (SEM)

Kornstørrelse: 0,05 mm (SEM)

Sortering: moderat (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: meget kantete (SEM)

Fragment 4, sedimentær fragment:

Størrelse: ca. 1,4 cm (SEM)

Korn: albitt, biotitt, muskovitt, kalifeltspat og kvarts (SEM)

Matriks: ca. 10 %, bestående av små korn av albitt, kvarts, kalifeltspat og noe illitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 1,0 mm, grovkornet grovsand (SEM)

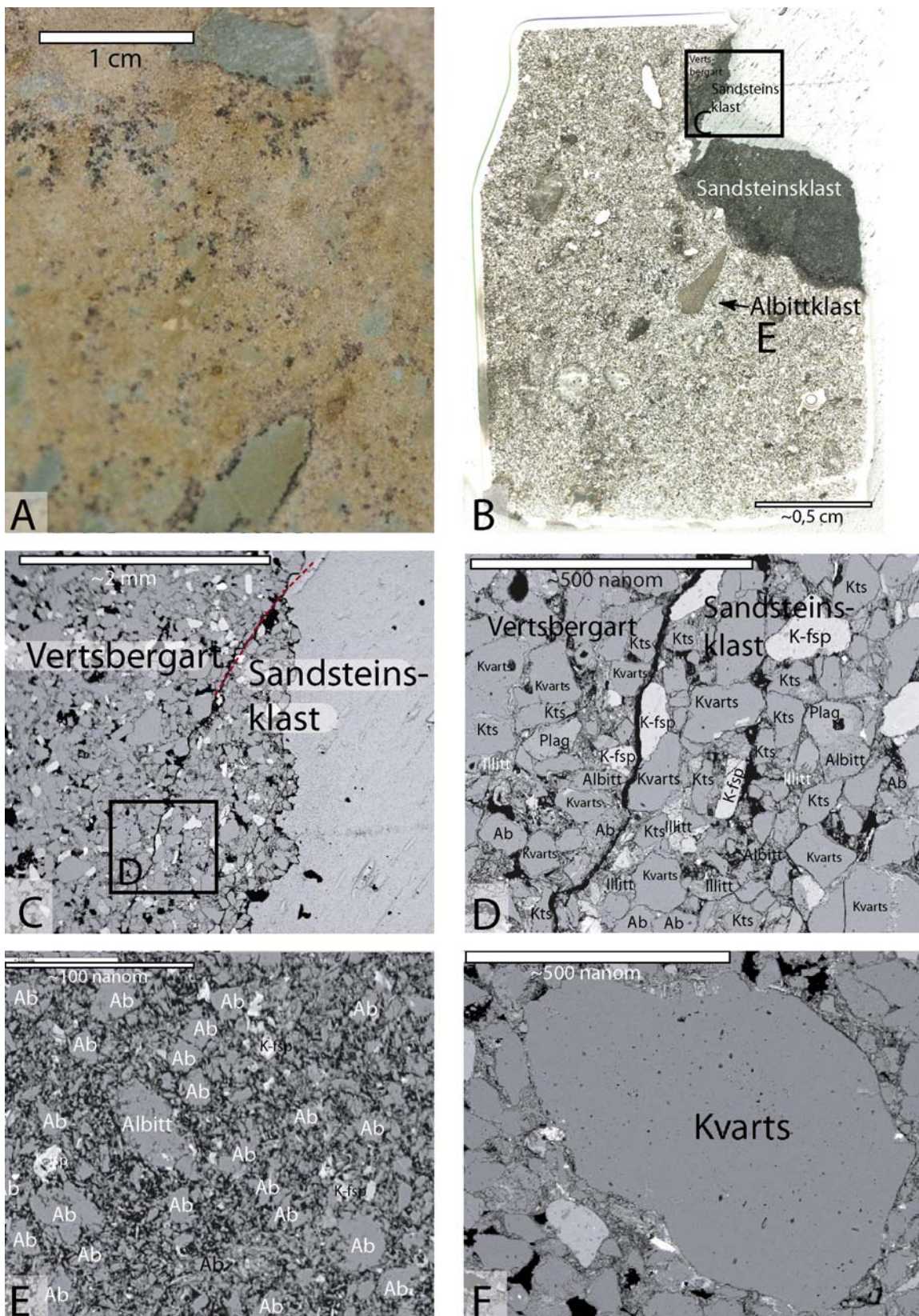
Sortering: veldig dårlig (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: kantete (SEM)

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.9):

De autigene mineralene i den kremgule grunnmassen viser at autigen kvarts forekommer i anhedrale former og har vokst på detriale kvartskorn. Autigen albitt forekommer som anhedrale påvekster på detriale albittkorn. Verken autigen kvarts eller autigen albitt forekommer som merkverdige porereduserende materialer. Autigen kloritt og illitt forekommer som et porefyllende materiale og grenser til autigene faser av både albitt og kvarts. Kalifeltspat er stedvis oppløst slik at sekundær porøsitet er dannet.



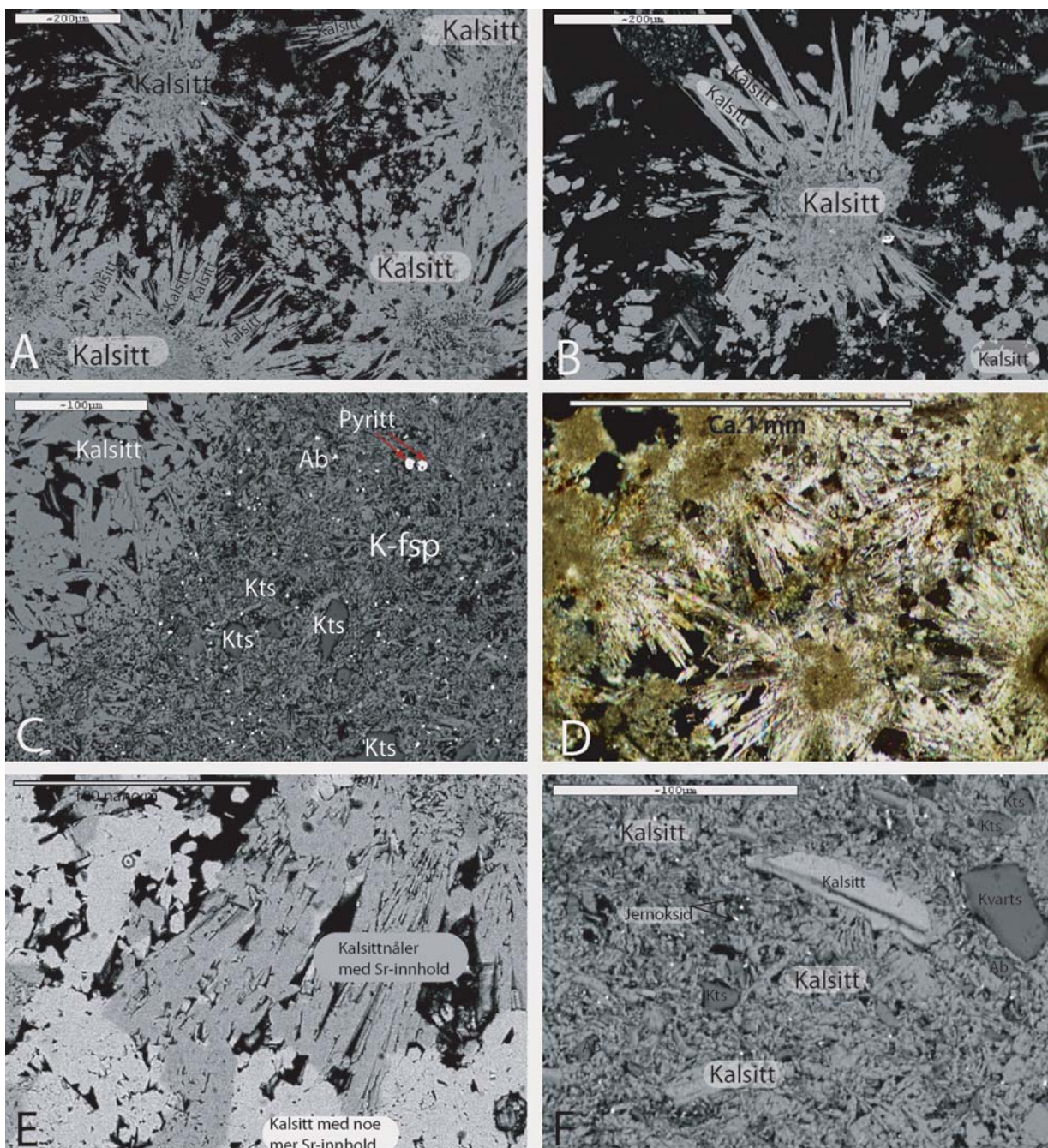
Figur 10.9: Bilder fra prøve KO3HS-27, breksje-tverrgang. **A:** Bilde av prøven i håndstykket som viser flere forskjellige klaster. **B:** Et tynnslipbilde uten blå epoxy, som viser klaster/fragmenter. **C:** BSE-bilde som viser en sandsteinsklaster. **D:** BSE-bilde som viser den samme sandsteinsklaster som i C, som er identisk med vertsbjergarten. **E:** BSE-bilde som viser en klaster bestående for det meste av albitt. **F:** Et BSE-bilde som viser hvor usortert matriksen i denne prøven er.

10.11 KO3HS-29

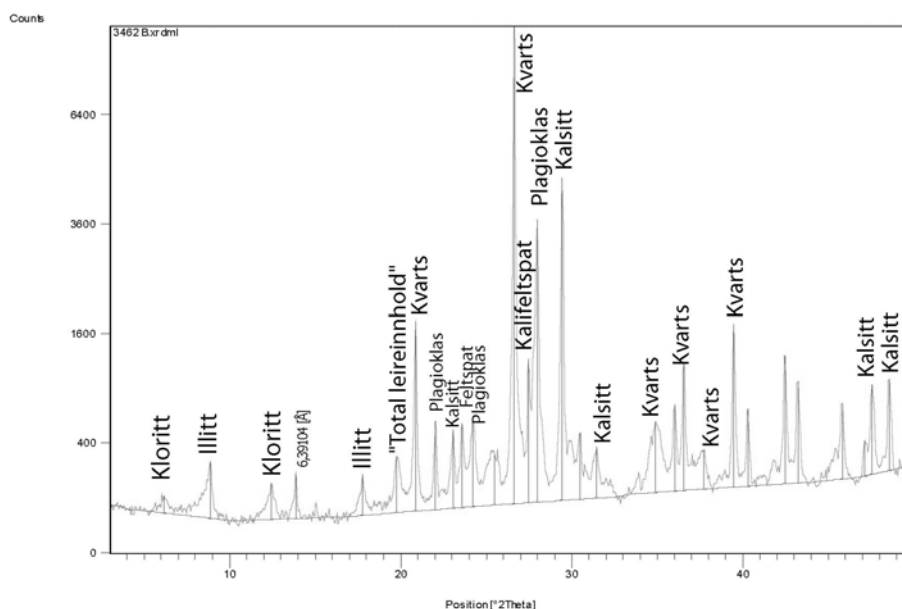
Prøve: **KO3HS-29**
Litologi: Breksje i en linse fra Witkop I
GPS: S: -31 08' 34.68850" Ø: 026 36' 54.44379"
Prepareringstype: Prøven er støpet i silikatbeholder, siden slipt ned til polert tynnslip
Innsamlet av: Henrik Svensen
Analysert av: Siri A. L. Sali
Andre analyser enn SEM, CL og XRD: $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Denne prøven består av mørkegrå og lysegrå leire som er lite kohesiv og noe kittaktig.

Beskrivelse av prøven fra SEM: Prøven inneholder korn som består av kvarts, albitt og kalifeltspat med en kornstørrelse på ca. 0,1 mm. Den inneholder også mange små klumper av pyritt. Alle disse fasene ligger i en masse bestående av nålformede kalsittkrystaller. Kalsittnålene er opptil 0,25 mm lange og ca. 0,03 mm brede. Ved stor kontrast i BSE-bildet ser man nyanser i gråfargen som indikerer ulikt kjemisk innhold i sonene. Fra analysene viser det seg at kalsittsementen inneholder strontium, og i de lyseste sonene er innholdet av strontium noe større. Innhold av strontium kan også være årsaken til at prøven ikke luminiserer under CL-mikroskopet.



Figur 10.10: Petrografibilder av prøve KO3HS-29. **A** og **B**: BSE-bilder som viser hvordan nålformede kalsittkrystaller har vokst i porene. **C**: BSE-bilde som viser hvordan ulike korn ligger i en masse av kalsitt. **D**: OM-bilde under kryssede Nicols som viser nålformede kalsittkrystaller. **E**: BSE-bilde under stor kontrast som viser gråere soner som har mindre innhold av strontium. **F**: BSE-bilde som er et nærbilde av matriksen som kalsittnålene har vokst ut ifra. Den inneholder korn som består av kvarts, albitt og stedvis jernoksider.

XRD-analyser (kun bulk er kjørt):**Toppliste, bulk:**

Pos. [°2Th.]	Høyde[cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand	Rel. Int. [%]	Mineral
6,1756	52,21	0,3542	14,31213	0,54	Kloritt
8,8677	236,26	0,2362	9,97224	2,44	Illitt
12,4404	122,79	0,2362	7,11528	1,27	Kloritt
13,8567	158,99	0,1771	6,39104	1,64	
17,7905	157,46	0,1771	4,98574	1,63	Illitt
19,7784	255,79	0,2952	4,48889	2,64	"Totalt leireinnhold"
20,8542	1730,64	0,1771	4,25970	17,89	Kwarts
22,0270	512,92	0,1771	4,03547	5,30	Plagioklas
23,0577	437,43	0,1771	3,85736	4,52	Kalsitt
23,5872	484,98	0,1771	3,77196	5,01	Feltspat
24,2268	541,06	0,1771	3,67380	5,59	Plagioklas
25,5016	238,98	0,5904	3,49297	2,47	
26,6412	9673,09	0,1771	3,34609	100,00	Kwarts
27,4731	1170,03	0,1181	3,24663	12,10	Kalifeltspat
27,9723	3608,35	0,1771	3,18981	37,30	Plagioklas
29,4379	4584,14	0,1771	3,03426	47,39	Kalsitt
30,4697	381,38	0,1771	2,93382	3,94	
31,4553	272,68	0,2952	2,84411	2,82	Kalsitt
34,8997	451,96	0,2362	2,57089	4,67	
36,0248	602,27	0,1771	2,49315	6,23	Kalsitt
36,5589	1077,54	0,1771	2,45794	11,14	Kwarts
37,7236	216,66	0,3542	2,38468	2,24	
39,4747	1585,84	0,1771	2,28285	16,39	Kwarts
40,3026	535,45	0,1771	2,23784	5,54	Kwarts
42,4672	1135,38	0,2362	2,12865	11,74	Kwarts
43,2210	817,90	0,2362	2,09326	8,46	
45,8085	563,37	0,2362	1,98086	5,82	
47,1303	223,13	0,1771	1,92835	2,31	
47,5738	732,32	0,1771	1,91140	7,57	Kalsitt

10.12 Hastighetsprøver

Fire prøver ble testet mot seismisk hastighet. To av disse er fra ventkomplekset Witkop I (KO1S-31 og -51), mens den tredje prøven er fra logg 1 (KO1S-3) og den fjerde er fra sidebergarten til Witkop I (KO1S-37).

10.13 KO1S-31

<i>Prøve:</i>	KO1S-31
<i>Litologi:</i>	Ventsandstein, Witkop I
<i>GPS:</i>	S: -31 08.569 S: 026.36.945
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Bergartsbeskrivelse av prøven i håndstykket:

Dette er en finkornet, lys kremgul og porøs sandstein med noen mørkere spredte klaster med leire.

Klassifikasjon: arkosisk sandstein (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Aksessorier (detriale): rutil, biotitt, muskovitt og zirkon (SEM) og kloritt (XRD)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små kvartskorn og rutil (SEM)

Autigene mineraler: kalifeltspat, albitt, kvarts, illitt, smektitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 2 mm, grovkornet finsand (SEM/OP)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: tangentielle, lange og flytende kornkontakter. Svak kompaksjon. (SEM)

Rundhet: kantete (SEM)

Dagens porøsitet: 14,7 % (fra NGI), der noe sekundær porøsitet er dannet som følge av oppløsning av pertittlameller og kalifeltspat (SEM).

Seismisk hastighet: $V_p=3592$ m/s ved 10 MPa (fra NGI)

Klast:

Størrelse: ca. 3,9 mm lang og 1,3 mm bred (SEM)

Mineraler: kvarts, albitt, biotitt, muskovitt, kalifeltspat, plagioklas, rutil og titanitt (SEM)

Matrix: ca. 50 %, bestående av illitt og små kvartskorn (SEM)

Kornstørrelse: 0,01 mm-0,05 mm, grovkornet finsilt-grovsilt (SEM)

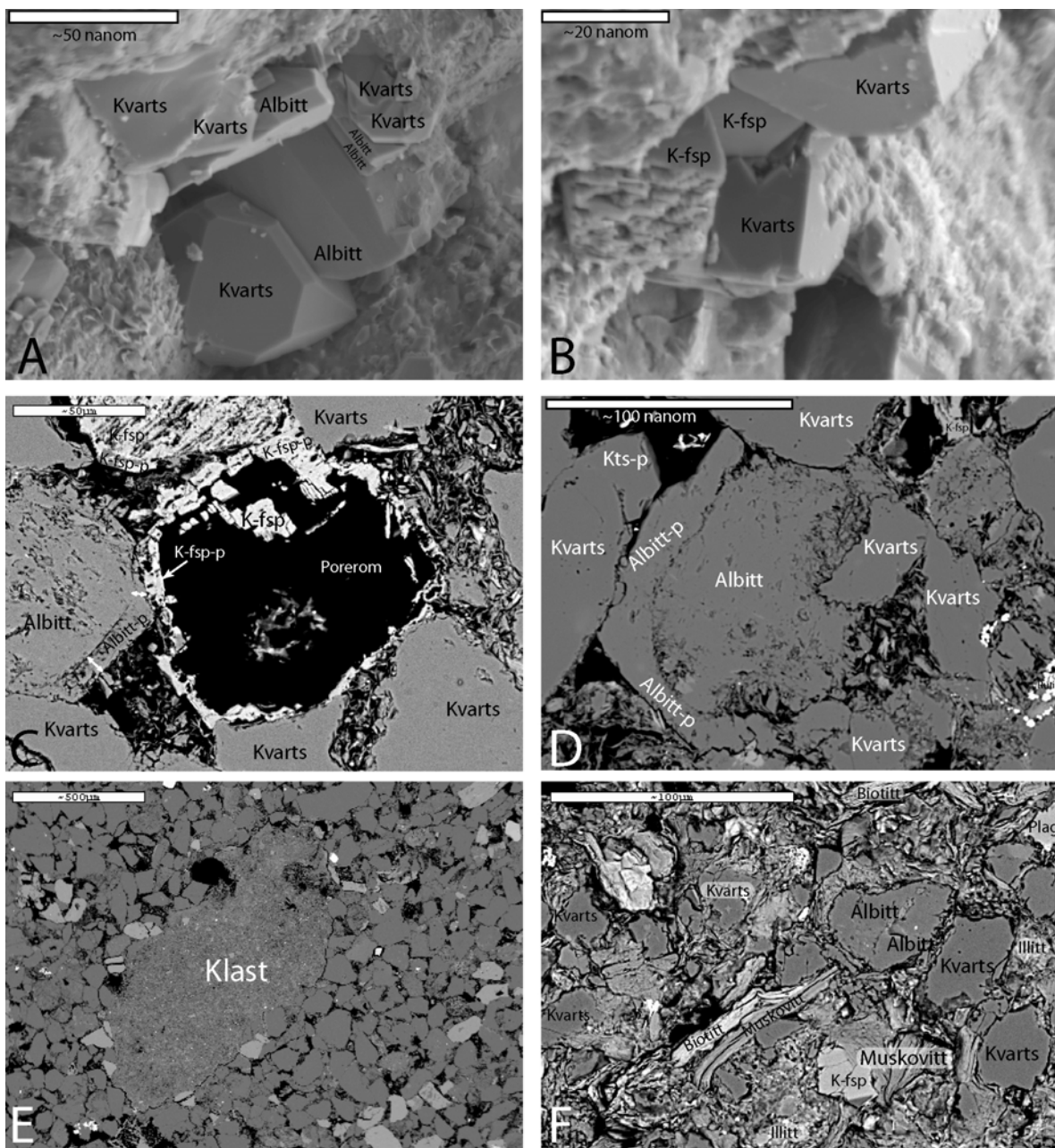
Sortering: meget dårlig (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: meget kantete (SEM)

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.11):

Autigen albitt forekommer som euhedrale krystaller sammen med euhedrale kvartskrystaller. Veksten av albitt- og kvartskrystallene har foregått omtrent samtidig ettersom de er observert vekselvis å fylle porerom. Autigen kalifeltspat er det lite av, dog det er observert som belegg på oppløste eller delvis oppløste detriale kalifeltspatkorn. Porefyllende illitt ligger utenfor denne autigene kalifeltspaten. Autigen albitt og autigen kalifeltspat grenser mot hverandre. Det antas at autigen albitt postdaterer autigen kalifeltspat ettersom autigen albittkant er tynnere i området som det grenser til den autigene kalifeltspaten, mens den autigene kalifeltspatkanten er like bred.



Figur 10.11: Prøve KO1S-31. **A:** SEI-bilde av stubb som viser hvordan euhedrale kvarts- og albitt krystaller har vokst om hverandre. **B:** SEI-bilde av stubb som viser hvordan autigen kvarts har vokst på autigen kalifeltspat. **C:** BSE-bilde som viser autigen albitt og autigen kalifeltspat som grenser mot hverandre. I midten av bildet ser man oppløst kalifeltspat, som muligens forsvant under prepareringen av tynnslipet. **D:** BSE-bilde som viser autigen albitt. **E:** BSE-bilde som er en oversikt over tynnslipet og som viser en klast. **F:** BSE-bilde av innholdet i en klast, som har mye mer matriks enn vertsbergarten. I tillegg er det mye mer biotitt og muskovitt.

10.14 KOIS-51

<i>Prøve:</i>	KOIS-51
<i>Litologi:</i>	Ventsandstein, Witkop I
<i>GPS:</i>	S: -31 08.572 S: 026.36.908
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoxy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Bergartsbeskrivelse av prøven i håndstykket:

Dette er en finkornet lys kremgul og porøs sandstein med noen mørkere spredte klaster med leire.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Aksesorier (detriale): rutil, biotitt, muskovitt og zirkon (SEM) og kloritt (XRD)

Matrix: ca. 2 %, bestående av små kvartskorn, albittkorn og rutil (SEM)

Autigene mineraler: kalifeltspat, albitt, kvarts, illitt, smektitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,15 mm, grovkornet finsand (SEM/OM)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: tangentielle, lange og flytende kornkontakter. Svak kompaksjon. (SEM)

Rundhet: kantet (SEM)

Dagens porøsitet: 14,67% (fra NGI), hvor noe av porøsiteten er dannet pga. oppløste pertittlameller (SEM).

Seismisk hastighet: $V_p=3450$ m/s ved 10 MPa (fra NGI)

Klast:

Størrelse: ca. 1 mm (SEM)

Mineraler: kvarts, albitt, muskovitt, kalifeltspat, plagioklas og rutil (SEM)

Matrix: ca. 50 %, bestående av illitt og små kvartskorn (SEM)

Kornstørrelse: 0,01 mm-0,05 mm, grovkornet finsilt-grovsilt (SEM)

Sortering: meget dårlig (SEM)

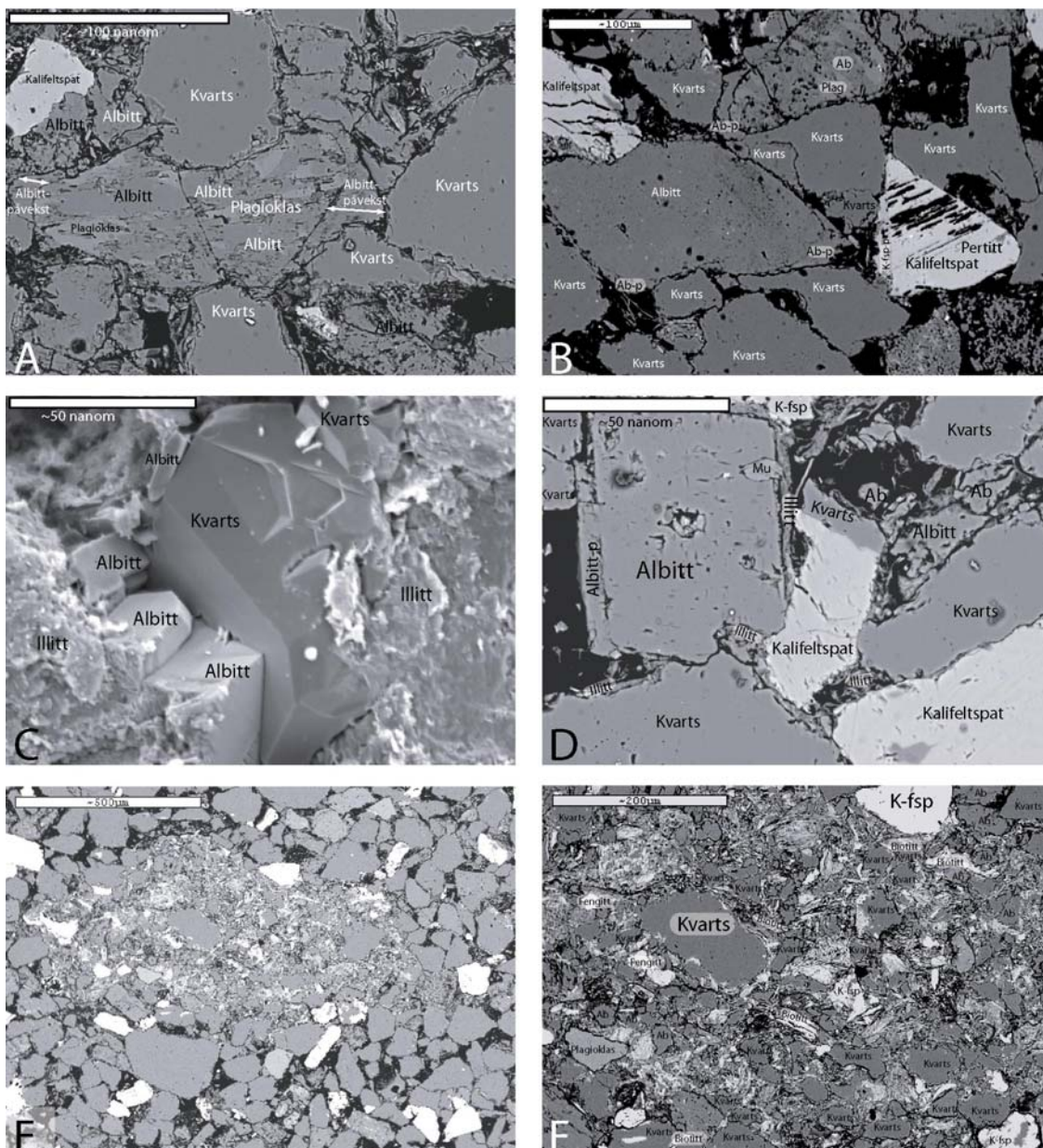
Kornkontakt/kompaksjon: flytende, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: meget kantete (SEM)

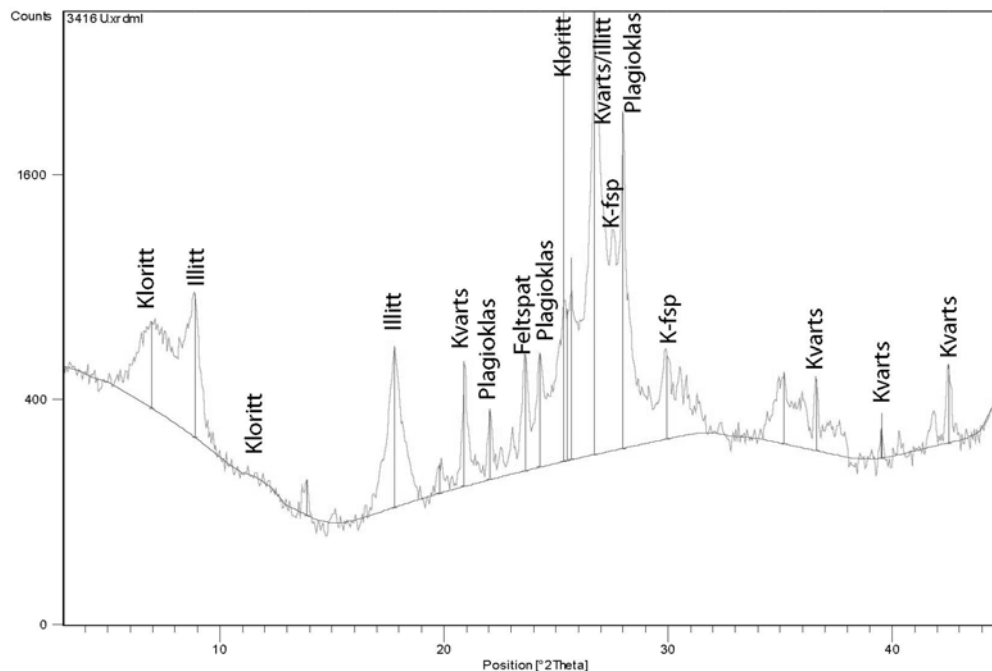
Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.12):

Autigen kalifeltspat forekommer som anhedral påvekst på detriale kalifeltspatkorn. Noen av de detriale kalifeltspatkornene som inneholder pertittlameller er delvis oppløst slik at albitten er fjernet og sekundær porøsitet dannet. Den autigene kalifeltspaten som omringer disse korna ligger jevnt rundt de detriale kalifeltspatkorna og de fyller ikke hulrommene forårsaket oppløsning av pertittlamellene, noe som indikerer at autigen kalifeltspat predaterer oppløsningen av pertittlamellene. Autigen kalifeltspat som har vokst på detriale kalifeltspatkorn er observert å grense til detriale albittkorn. Dette detriale albittkornet er omringet av autigen euhedral albitt som grenser til den autigene anhedrale kalifeltspaten. Autigen albitt postdaterer derfor den autigene kalifeltspaten. Autigen albitt forekommer som påvekst på detriale albitt- og plagioklaskorn. Autigen albitt kan enten ligge som anhedral eller euhedral påvekst eller som porefyllende materiale. Euhedrale albittkorn er observert å grense til euhedrale kvartskorn som betyr at kvarts og albitt har vokst omtrent samtidig. Autigen kvarts vokser på detriale kvartskorn. SEM-bilder fra stubber viser euhedrale kvartskorn, mens CL-bilder fra tynnslip viser euhedrale kvartspåvekster. Autigene leirmineraler er for det meste

illitt og kloritt. Autigen smektitt er observert fra stubber på SEM, og det forekommer i nålform på detriale korn. Autigen illitt forekommer i trådform som fyller porene. Det ligger også som belegg på detriale albitt-, kvarts- og plagioklaskorn. Autigen kloritt ligger i soner på tynnslipet, og forekommer som et porefyllende materiale.



Figur 10.12: SEM-bilder av KO1S-51. **A:** BSE-bilde som viser albitt-påvekst som fyller porer. **B:** BSE-bilde som viser autigen albitt og kalifeltspat. Den autigene kalifeltspaten dekker over (men fyller ikke) hulrommene fra oppløst pertitt. **C:** SEI-bilde som viser euhedrale krystaller av albitt og kvarts som grenser mot hverandre. **D:** BSE-bilde som viser autigen albitt på venstre side av et detrialt albittkorn. Til høyre for det detriale albittkornet sees det et belegg av illitt. **E:** BSE-bilde av en klast. **F:** Et nærbilde av klasten i E. Klasten består av meget dårlig sorterte korn bestående for det meste av kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat. Grunnmassen består av glimmermineraler som fengitt, biotitt og muskovitt, samt illitt og kloritt.

XRD-analyser:**Leirmineraldiffraksjon:****Toppliste, leirmineraldiffraksjon:**

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineraler
6,9525	351,94	0,8266	12,71451	0,79	Kloritt
8,8980	585,47	0,2362	9,93837	1,32	Illitt
13,8960	70,14	0,3542	6,37306	0,16	
17,8073	502,49	0,2952	4,98108	1,13	Illitt
19,8215	68,19	0,4723	4,47923	0,15	
20,9217	396,85	0,1771	4,24609	0,89	Kvarst
22,0516	201,70	0,1771	4,03101	0,45	Plagioklas
23,6451	389,73	0,2362	3,76284	0,88	Feltspat
24,2883	386,66	0,1771	3,66463	0,87	Plagioklas
25,3500	44363,45	0,1612	3,51351	100,00	Kloritt
25,5021	570,90	0,5904	3,49290	1,29	
25,6694	843,80	0,2880	3,47052	1,90	
26,7042	2832,35	0,2362	3,33833	6,38	Kvarst/illitt
27,9926	1832,71	0,1771	3,18754	4,13	Plagioklas
29,9531	301,51	0,2952	2,98322	0,68	Kalifeltspat
35,1779	244,70	0,4133	2,55120	0,55	
36,6086	235,55	0,1771	2,45472	0,53	Kvarst
39,5078	84,97	0,1771	2,28101	0,19	Kvarst
39,5582	133,78	0,6196	2,27822	0,30	
42,5192	272,38	0,2160	2,12441	0,61	Kvarst

10.15 KO1S-37

<i>Prøve:</i>	KO1S-37
<i>Litologi:</i>	Rød slambergart, sidebergart til Witkop I
<i>GPS:</i>	S: -31 08.605 Ø: 026 36.984
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en rødfarget slambergart med lagning som bruser i kontakt med saltsyre (inneholder kalsitt).

Klassifikasjon: slambergart (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, kalifeltspat og plagioklas (SEM)

Aksessorier (detriale): ilmenitt, zirkon, hematitt/gøtitt, biotitt, muskovitt og rutil (SEM)

Matriks: ca. 2 % bestående av små korn av kvarts, plagioklas og albitt (SEM)

Autigene mineraler: kalsitt, albitt, kvarts, illitt, ilmenitt (aksessorisk) (SEM) og kaolinitt (XRD)

Kornstørrelse: 0,02 mm, mellomstilt (SEM)

Sortering: god (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle, svak kompaksjon (SEM)

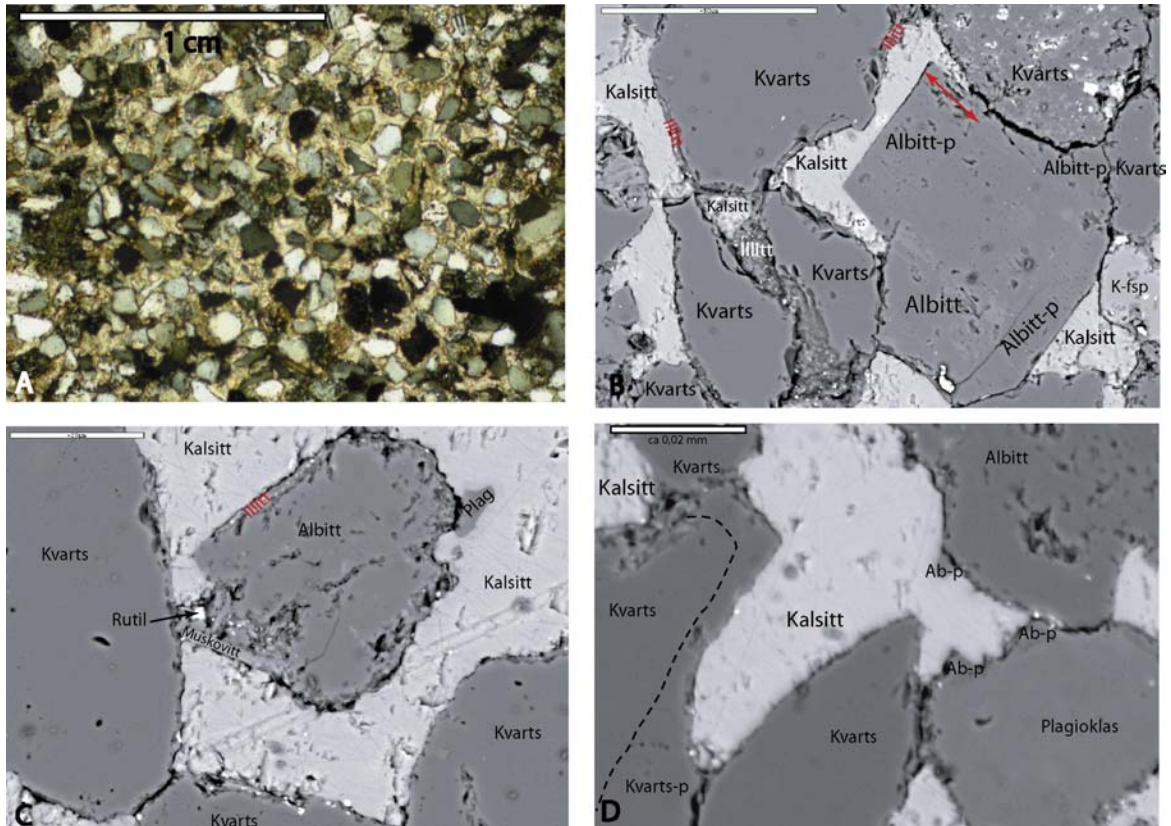
Rundhet: subkantete (SEM)

Porøsitet: 5,85 % (NGI), hvorav det meste er primær porøsitet.

Seismisk hastighet: ved 10 MPa: $V_p = 4205$ m/s, $V_s = 2411$ m/s (NGI)

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.13):

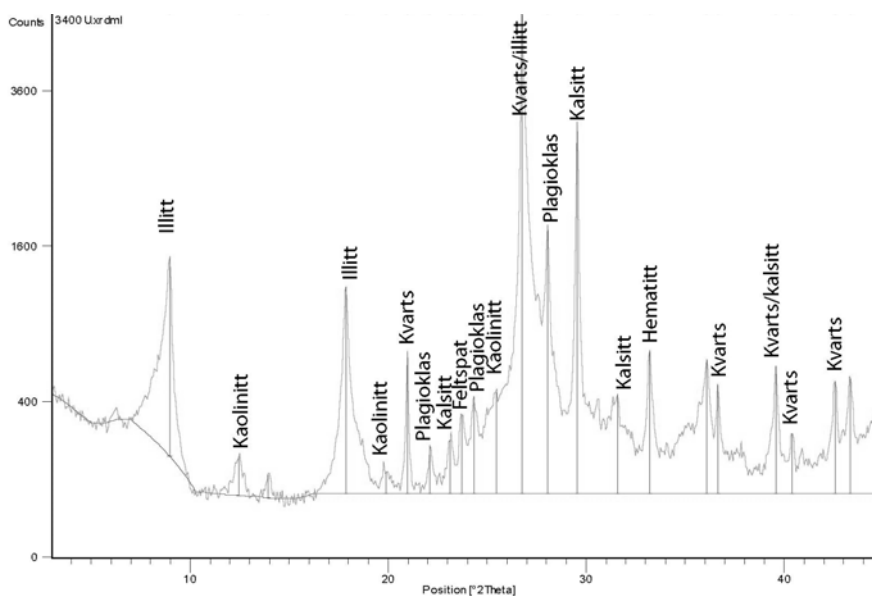
Autigen albitt forekommer som euhedrale krystaller og som porefyllende materiale som har vokst på detriale albittkorn eller plagioklaskorn. Autigen kvarts har vokst på detriale kvartskorn og er observert på basis av CL-studier på SEM. Autigen albitt er i mengde mye mer framtrædende enn autigen kvarts. Autigen kvarts og albitt predaterer den autigene kalsitten. Autigen kalsitt forekommer som porefyllende poikilotopisk sement og er gjennomgående i hele bergarten. Stedvis har kalsittsementen godt utviklede romboedriske kløv. Den porefyllende kalsittsementen grenser både til autigen albitt og autigen kvarts. Der kalsittsementen grenser mot detriale korn ligger det som oftest mot et illitt i trådform som utgjør et belegg rundt de detriale korna. Dermed ser det ut til at autigen albitt og kvarts har vokst på detriale korn som ikke har vært omringet av et illittbelegg slik at det postdaterer utfellingen av illitt. Autigen ilmenitt er aksessorisk, og det er porefyllende. I poren grenser autigent ilmenitt mot detriale korn, og den porefyllende kalsitten ligger mer mot midten av poren. Ilmenittutfellingen predaterer derfor kalsittutfellingen.



Figur 10.13: Petrografibilder av KO1S-37. **A:** Bilde av tynnslip i OM under kryssede Nicols. Kalsittsementen er gjennomgående i hele prøven. **B:** BSE-bilde av kalsittsement som grenser til autigen albitt som forekommer både som euhedrale og anhedrale påvekster på detriale albittkorn. Det ligger et illittbelegg rundt detriale korn som grenser mot kalsittsementen. **C:** BSE-bilde av kalsittsement som har godt utviklede romboedriske kløv. **D:** BSE-bilde som viser autigen kvarts som er påvist på basis av CL-studier på SEM-en. Det ligger ikke illittbelegg mellom kalsittsementen og autigen albitt eller autigen kvarts. Den striplete linjen representerer grensen mellom autigen og detriale kvarts, basert på CL-studier på SEM-en.

XRD-analyser:

Lerimineraldiffraksjon:



Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
8,9552	1326,55	0,2362	9,87508	26,03	Illitt
12,4595	103,56	0,2952	7,10441	2,03	Kaolinit
13,9255	53,54	0,3542	6,35958	1,05	
17,8556	1140,38	0,2362	4,96770	22,38	Illitt
19,8906	53,06	0,3542	4,46383	1,04	Kaolinit
20,9655	632,12	0,2362	4,23732	12,40	Kvarts
22,1284	138,45	0,1771	4,01720	2,72	Plagioklas
23,1367	160,48	0,2362	3,84437	3,15	Kalsitt
23,7122	266,43	0,2362	3,75236	5,23	Feltspat
24,3372	359,55	0,2362	3,65738	7,06	Plagioklas
26,7586	5096,00	0,1771	3,33167	100,00	Kvarts/illitt
28,0552	1759,32	0,2362	3,18057	34,52	Plagioklas
29,5525	3067,94	0,2362	3,02275	60,20	Kalsitt
31,5720	371,94	0,3542	2,83386	7,30	Kalsitt
33,2033	642,82	0,2362	2,69826	12,61	Hematitt
36,0950	578,94	0,2362	2,48846	11,36	
36,6556	422,93	0,1771	2,45168	8,30	Kvarts
39,5922	534,38	0,1771	2,27634	10,49	Kvarts
40,4084	187,29	0,1771	2,23222	3,68	Kvarts
42,5723	444,51	0,1771	2,12364	8,72	Kvarts
43,3465	457,63	0,2160	2,08576	8,98	

10.16 KOIS-3

Prøve: KOIS-3
Litologi: Kremgul sandstein, logg 3
GPS: S:-31 08.874 Ø: 026 37.162
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoxy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket:

Dette er en lys kremgul, finkornet og porøs sandstein som inneholder lysebrune klaster med leire. Den har spredte soner med noe lilla og svart materiale.

Klassifikasjon: arkose (SEM/OM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM/OM)

Aksessorier (detritale): muskovitt, biotitt, zirkon og apatitt (SEM)

Matrix: ca. 2 %, bestående av små kvartskorn, apatitt og rutil (SEM)

Autigene mineraler: kalifeltspat, albitt, kvarts, illitt, kloritt og titanitt (SEM/XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Sortering: god (SEM/OM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle kornkontakter, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: meget kantete (SEM)

Dagens porøsitet: 13,23 % (fra NGI). Det meste av porerommene er primære. En liten andel av porerommene er sekundære og dannet pga. oppløsning av feltspat (kalifeltspat med pertittlameller og bergartsfragmenter bestående av kvarts og kalifeltspat (SEM)).

Seismisk hastighet: $V_p = 3746$ m/s ved 10 MPa (fra NGI)

Klast:

Størrelse: ca. 0,6 mm (SEM)

Mineraler: kvarts, albitt, plagioklas, albitt og kalifeltspat (SEM)

Matrix: kloritt og illitt (SEM)

Kornstørrelse: 0,007 mm-0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Sortering: meget dårlig (SEM)

Kornkontakt: flytende, svak kompaksjon (SEM)

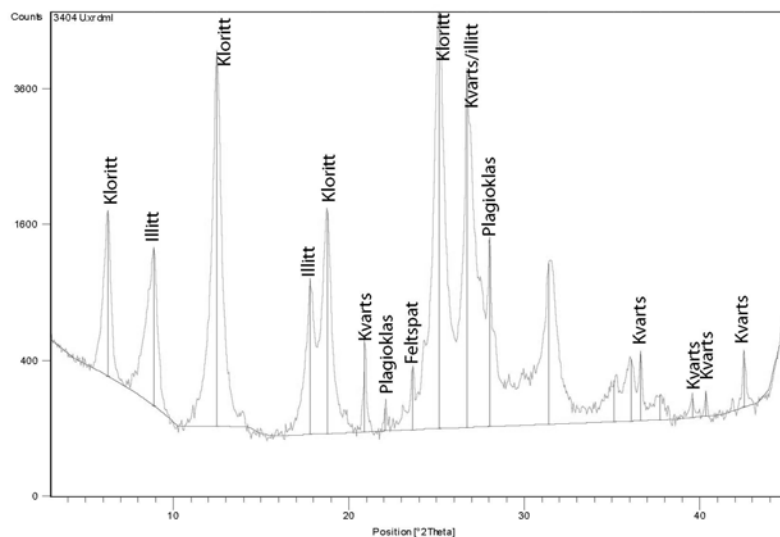
Rundhet: meget kantete (SEM)

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.14):

Albitt forekommer som påvekst på detriale albittkorn og har stedvis utviklet fine euhedrale krystaller i porerommene. Albittpåvekst er observert å grense til autigen kalifeltspat som har vokst på et detrial kalifeltspatkorn. Veksten av albitt og kalifeltspat kan derfor ha pågått samtidig. Autigen kvarts er observert fra CL-studier på SEM, og det har vokst på detriale kvartskorn. Autigen kvarts er observert å grense til autigen kalifeltspat, og derfor kan den autigene veksten av både kvarts, kalifeltspat og albitt ha pågått samtidig. Kvartspåveksten er mye større i områder som ikke grenser til den autigene kalifeltspaten enn i de områdene der kvartspåveksten grenser til den autigene kalifeltspaten. Dette kan bety at den autigene kalifeltspaten predaterer den autigene kvartsen. Illitt forekommer i trådform som både omringer detriale korn og som fyller porene. Kloritt er porefyllende og er også observert som "sprikende glimmer" ("splaying mica"). Titanitt forekommer i sementform uten kløv og utviklet krystallstruktur, og det ligger mot illitt som igjen ligger som et belegg på detriale korn.

XRD-analyser:

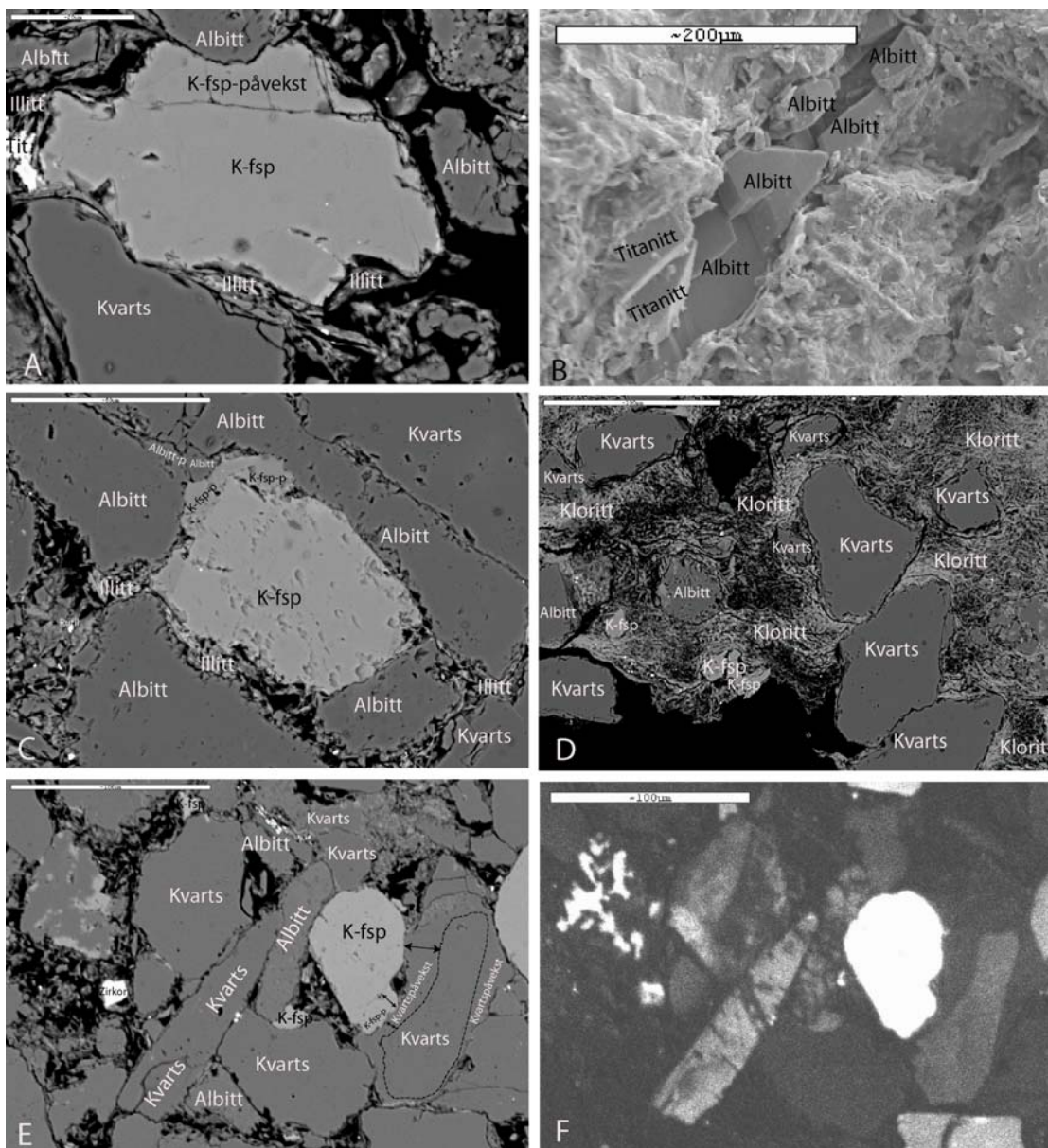
Leirmineraldiffraksjon:



Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avtand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2767	1456,42	0,3542	14,08176	28,89	Kloritt
8,9031	1158,26	0,2362	9,93268	22,97	Illitt
12,5002	4212,10	0,2952	7,08134	83,55	Kloritt
17,8095	946,51	0,2362	4,98047	18,77	Illitt
18,7906	1671,72	0,2952	4,72259	33,16	Kloritt
20,9213	437,62	0,1771	4,24618	8,68	Kvarts
22,0667	72,70	0,2362	4,02830	1,44	Plagioklas
23,6368	262,22	0,1771	3,76414	5,20	Feltspat
25,1459	5041,67	0,4133	3,54157	100,00	Kloritt
26,7296	3874,56	0,2952	3,33523	76,85	Kvarts/illitt

28,0105	1348,62	0,1771	3,18555	26,75	Plagioklas
31,3882	1055,15	0,4133	2,85003	20,93	
35,1260	169,57	0,3542	2,55485	3,36	
36,0916	283,08	0,2952	2,48868	5,61	
36,6292	333,85	0,1771	2,45338	6,62	Kvarts
37,7087	94,81	0,5904	2,38559	1,88	
39,5653	73,42	0,3542	2,27783	1,46	Kvarts
40,3450	101,22	0,2362	2,23559	2,01	Kvarts
42,5309	284,60	0,2160	2,12385	5,64	Kvarts



Figur 10.14: Prøve KO1S-3. **A:** BSE-bilde av tynnslip som viser hvordan autigen kalifeltspat har vokst på et detrialt kalifeltspatkorn og at det i tillegg virker porefyllende. **B:** SEI-bilde av stubb som viser hvordan autigen albitt danner euhedrale krystaller i porerom. **C:** Et BSE-bilde av tynnslip som viser hvordan autigen albitt og kalifeltspat grenser mot hverandre. Det detriale kalifeltspatkornet inneholder litt Na, mens den autigene kalifeltspaten er fri for Na. **D:** Et BSE-bilde av tynnslip som viser materialet av en klast. Flytende og kantete korn av kvarts, albitt og kalifeltspat som ligger i en matriks av leire (kloritt og illitt). **E:** Et BSE-bilde av tynnslip som viser hvordan autigen kalifeltspat og kvarts grenser mot hverandre. Den striplete linjen representerer grensen mellom detrialt og autigen kvarts. **F:** Et CL-bilde av samme plass på tynnslipet som E. Det viser hvordan den autigene kvartsen ikke luminiserer, og at påveksten er størst i de områdene som ikke grenser til den autigene kalifeltspaten.

10.17 Rød slamstein

Totalt 2 prøver av røde slambergarter fra området rundt Witkop I er beskrevet i detaljer. Dette KO1S-21 som beskrives herunder og KO1S-37 som er beskrevet i 10.16.

10.18 KO1S-21

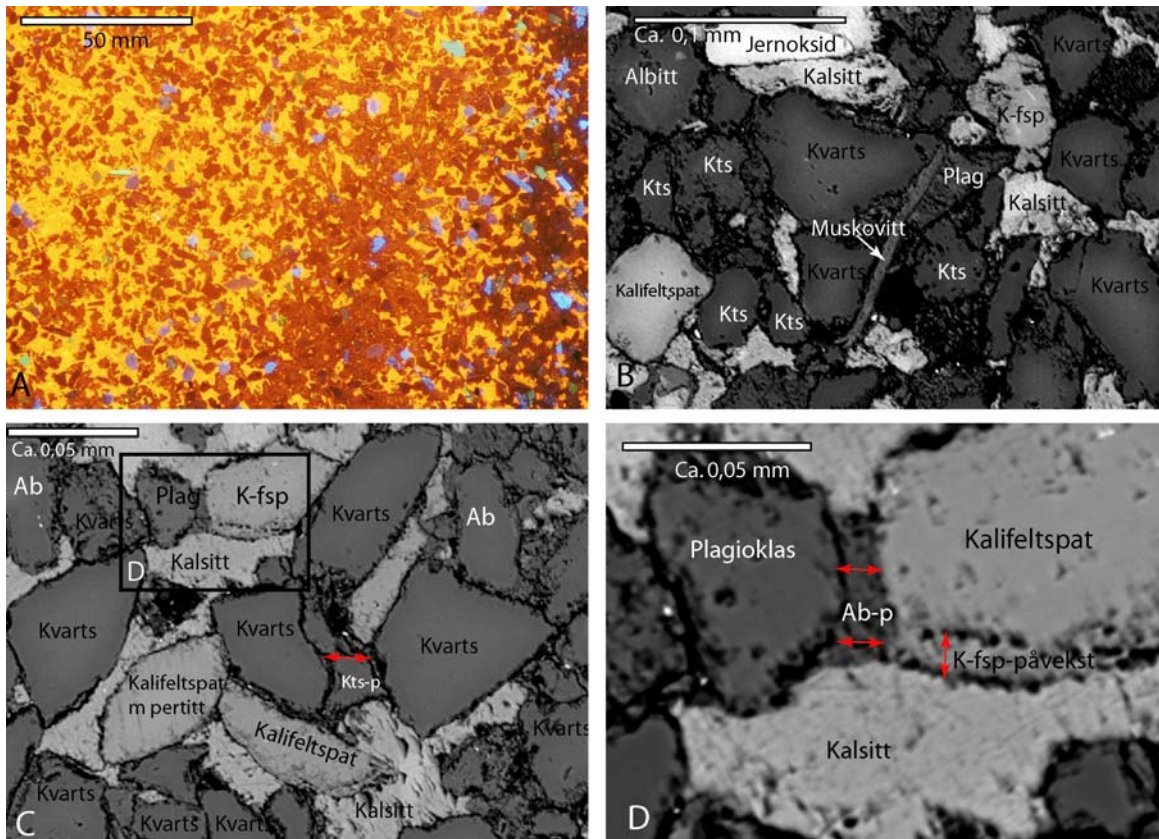
Prøve: **KO1S-21**
Litologi: Rød sandstein, logg 3
GPS: S: -31 08.694 Ø: 026 36.953
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoksy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali
Andre analyser enn SEM, CL og XRD: $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en rødfarget finkornet sandstein med lagning som bruser i kontakt med saltsyre (inneholder kalsitt).

Klassifikasjon: sandholdig siltstein (SEM) (etter Folk, 1954)
Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, kalifeltspat og plagioklas (SEM)
Aksessorier (detriale): ilmenitt, zirkon, hematitt/gøtitt, biotitt, muskovitt og rutil (SEM)
Matriks: ca. 2 % bestående av små korn av kvarts, plagioklas og albitt (SEM), illitt og kloritt (XRD)
Autigene mineraler: kalsitt, kalifeltspat og albitt (SEM)
Kornstørrelse: 0,08 mm, finkornet finsand (SEM)
Sortering: god (SEM)
Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle, svak kompaksjon (SEM)
Rundhet: subkantete (SEM)
Porøsitet: ca. 3 % (SEM-kartlegging), primær porøsitet
Bevaring: prøven er noe forvitret slik at det er vanskelig å se diagenetiske påvekster.

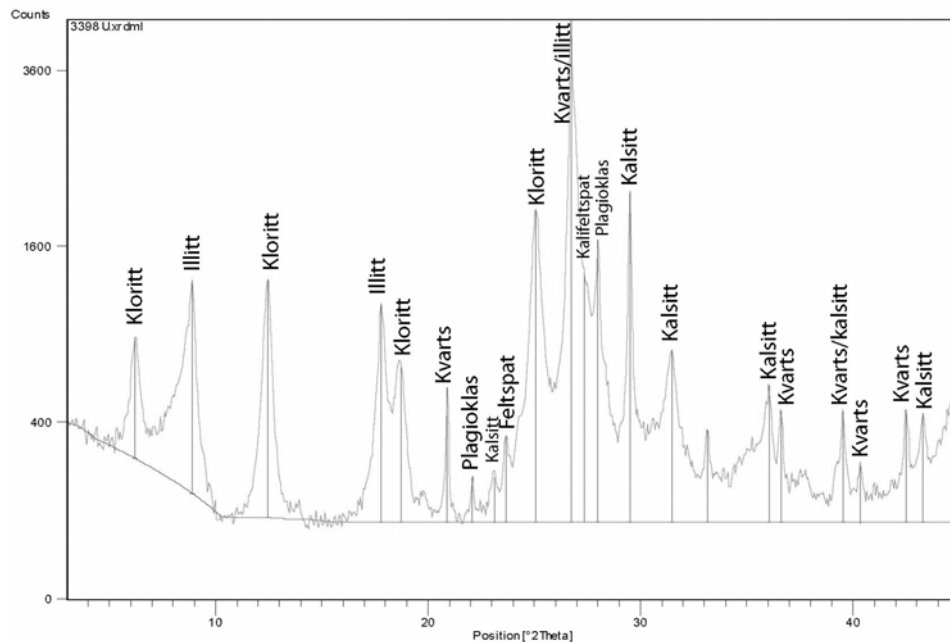
Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.15):

Autigen albitt er observert som påvekst på detriale plagioklaskorn, og det grenser til både detriale og autigen kalifeltspat. Autigen kalifeltspat opptrer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn. Autigen kalsitt opptrer som poikilotopisk sement uten utviklede romboedriske kløv og som et porefyllende materiale, og det er gjennomgående i hele prøven. Kalsittsementen grenser mot autigen albitt og autigen kalifeltspat mot poreveggen. Derfor postdaterer den autigene kalsitten den autigene albitten og den autigene kalifeltspaten. Ut ifra den røde fargenyansen i kalsittsementen fra CL-bildene ser man en mørkere rød farge og en lysere rød farge. Denne fargenyansen tilsier at det har pågått minst to utfellinger av kalsitt, og kanskje utfellingene pågikk omtrent samtidig. Det har ikke lyktes å finne autigen kvarts som euhedrale krystaller til tross for studier av stubb på SEM. Det eneste som er funnet av autigen kvarts er en påvekst fra et detrialt kvartskorn. Det er en tydelig fremtredende støvkant mellom det detriale kornet og den autigene påveksten, se 10.15 C. Den autigene påveksten følger formen på det detriale kornet. Kalsittsementeringen postdaterer den autigene kvartsen ettersom kalsitten ligger i mer sentrale deler av poren.



Figur 10.15: Petrografibilder av prøve KOIS-21. **A:** CL-bilde som viser guloransje luminesens fra kalsittsementen som er poikilotopisk. **B:** BSE-bilde fra SEM som viser hvordan kalsittsementen er fordelt. **C:** BSE-bilde som viser autigen kvarts som har vokst på detriale kvartskorn og hvordan kalsittsementen fyller porerommene og grenser til den autigene kvartsen. **D:** BSE-bilde som viser de tre autigene fasene albitt, kalifeltspat og kalsitt som grenser mot hverandre. Både autigen albitt og autigen kalifeltspat prederater den autigene kalsittsementen.

**Leirmineral-analyser:
Leirmineraldiffraksjon:**



Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,1928	622,02	0,3542	14,27242	14,57	Kloritt
8,9082	1168,07	0,2362	9,92699	27,36	Illitt
12,4597	1229,52	0,3542	7,10431	28,80	Kloritt
17,8084	1039,62	0,2362	4,98077	24,35	Illitt
18,7354	618,80	0,4133	4,73636	14,49	Kloritt
20,9100	497,99	0,1181	4,24845	11,66	Kvarts
22,0910	115,17	0,1771	4,02392	2,70	Plagioklas
23,1132	434,98	0,1771	3,84822	2,43	Kalsitt
23,6553	261,62	0,2362	3,76124	6,13	Feltspat
25,0662	1879,43	0,4133	3,55264	44,02	Kloritt
26,7179	4269,32	0,2362	3,33665	100,00	Kvarts/illitt
27,9965	1585,37	0,1771	3,18711	37,13	Plagioklas
29,4989	2065,00	0,2362	3,02812	48,37	Kalsitt
31,4733	721,97	0,4133	2,84252	16,91	Kalsitt
33,1458	291,21	0,1771	2,70281	6,82	Aragonitt?
36,0509	505,69	0,2362	2,49140	11,84	Kalsitt
36,6108	373,52	0,1771	2,45457	8,75	Kvarts
39,5360	374,74	0,1771	2,27944	8,78	Kvarts/kalsitt
42,5114	382,10	0,1771	2,12654	8,95	Kvarts
43,2994	365,92	0,2880	2,08792	8,57	Kalsitt

10.19 Kremgul sandstein

Det er detaljbeskrevet sju prøver fra kremgule sandsteiner fra området rundt Witkop I. Fire av disse prøvene kommer fra ett og samme lag (KOIS-1-8-22-32) og de siste tre prøvene kommer fra et annet lag, men det samme laget, (KOIS-6-12-26).

10.20 KOIS-1

Prøve: **KOIS-1**
Litologi: Kremgul sandstein, logg 1
GPS: S: -31 08.876 Ø: 026 37.167
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoksy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en mørk kremgul og finkornet sandstein med mørke brune klaster på ca. 5 mm bestående av leire og gråe klaster bestående av kalsitt.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, klafeltspat og albitt (SEM)

Aksessorier (detriale): rutil, biotitt, muskovitt, zirkon, barytt, titanitt (Al-holdig) og ilmenitt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts, plagioklas, kalifeltspat, albitt og rutil (SEM- kartlegging)

Autigene mineraler: albitt, kvarts, illitt og titanitt (Al-holdig og aksessorisk) (SEM) og kloritt (XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: tangentielle kornkontakter, svak-moderat kompaksjon (SEM)

Sortering: godt sortert (SEM)

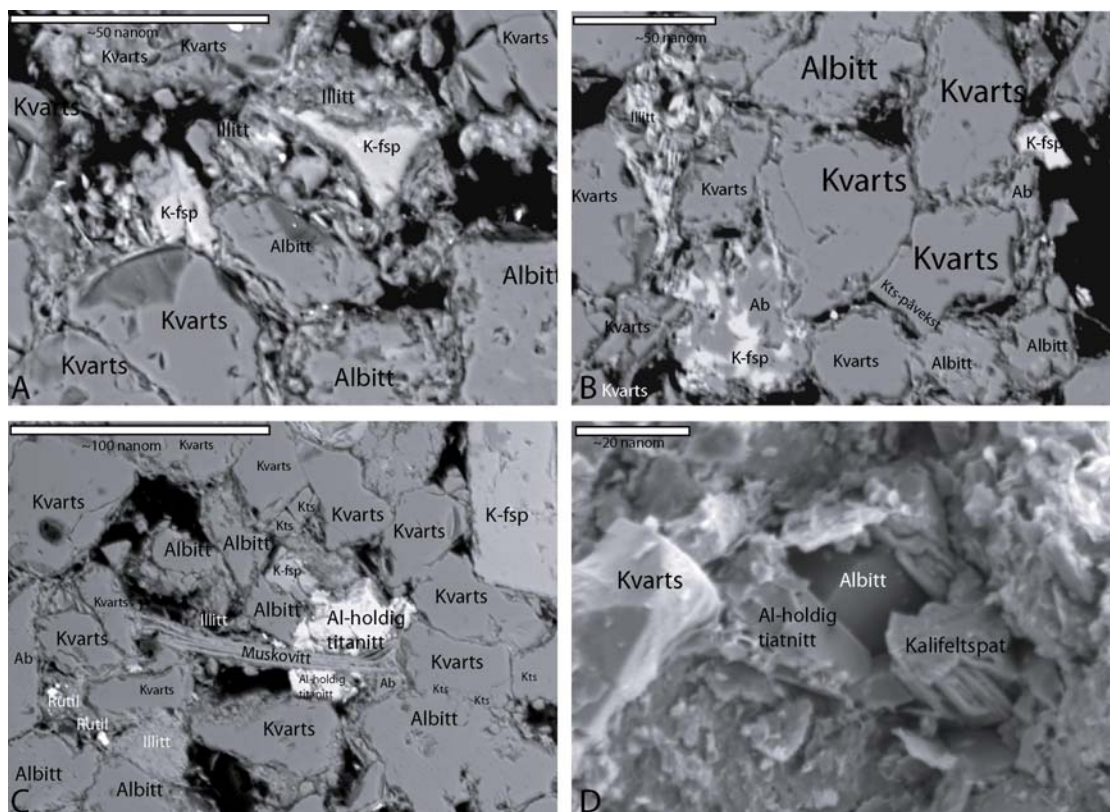
Rundhet: meget kantete (SEM)

Dagens porøsitet: ca. 10 % (SEM-kartlegging). Det meste er primær porøsitet, dog noe oppløsning av detriale kalifeltspatkorn, albittkorn og kvartskorn har forårsaket sekundær porøsitet.

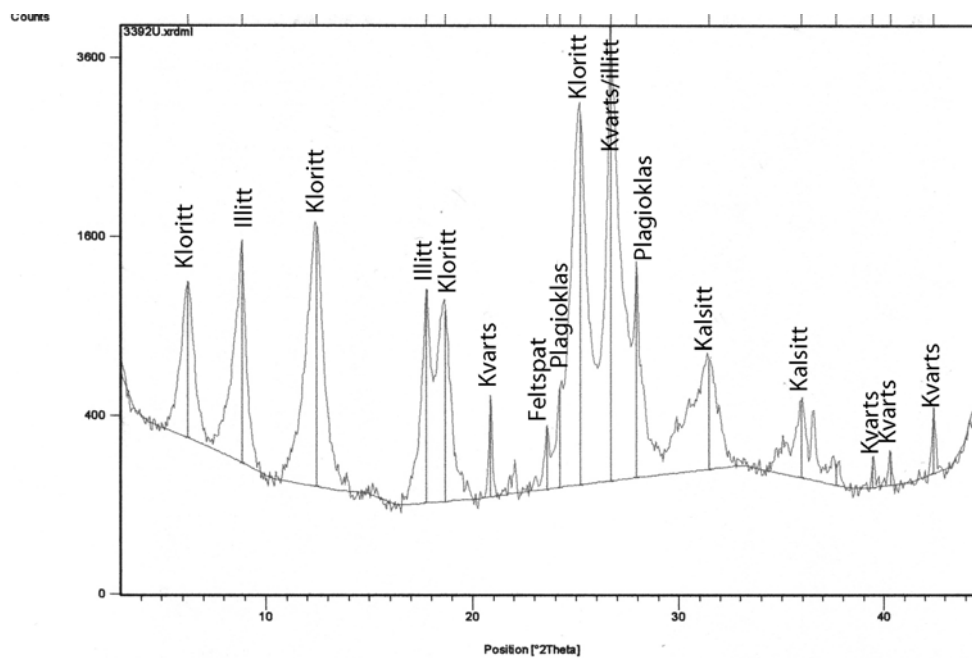
Bevaring: Prøven er meget forvitret, og det er vanskelig å finne de diagenetiske forholdene.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.16):

Autigen albitt forekommer både som anhedrale og euhedrale påvekster på detriale albittkorn. Påvekstene virker stedvis som et porefyllende materiale. Autigen kvarts opptre som påvekst på detriale kvartskorn og virker som et porefyllende materiale. Det lyktes ikke å finne autigen albitt som grenser til autigen kvarts, slik at de diagenetiske forholdene mellom disse to fasene er ubestemt. Illitt opptre i trådform som porefyllende materialer. Autigen illitt grenser til både detriale og autigene faser av kvarts og albitt, og i tillegg grenser de til detriale korn av kalifeltspat. Autigen Al-holdig titanitt forekommer aksessorisk som et porefyllende sement uten kløv. Det grenser til detriale korn av muskovitt, kvarts og kalifeltspat.



Figur 10.16: SEM-bilder fra prøve KO1S-1. **A:** BSE-bilde som viser hvordan illitt har tatt plassen til kalifeltspat. **B:** BSE-bilde som viser hvordan en kvartspåvekst følger formen til et detrialt kvartskorn. **C:** BSE-bilde som viser hvordan Al-holdig titanitt fyller porerom. Muskovittflaket forekommer som sprikende glimmer. **D:** SEI-bilde som viser euhedrale albitt- og kvartskorn.

XRD-analyser:**Leirminerladiffraksjon:****Toppliste, leirminerladiffraksjon:**

Pos. [°2Th.]	Høyde[cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2557	911,28	0,4723	14,12896	23,22	Kloritt
8,8468	1352,92	0,2362	9,99580	34,48	Illitt
12,4537	1543,86	0,4133	7,10767	39,34	Kloritt
17,7717	1059,47	0,2362	4,99098	27,00	Illitt
18,6796	899,32	0,4723	4,75040	22,92	Kloritt
20,8696	379,97	0,1771	4,25658	9,68	Kvarts
23,5853	206,29	0,1771	3,77226	5,26	Feltspat
24,2307	396,50	0,1771	3,67323	10,10	Plagioklas
25,2210	2742,36	0,4723	3,53118	69,88	Kloritt
26,6808	3924,31	0,3542	3,34120	100,00	Kvarts/illitt
27,9497	1214,85	0,1771	3,19234	30,96	Plagioklas
31,4799	492,78	0,4133	2,84194	12,56	Kalsitt
35,9943	302,21	0,2952	2,49519	7,70	Kalsitt
37,6723	64,85	0,4723	2,38782	1,65	
39,4725	94,88	0,1771	2,28297	2,42	Kvarts
40,3209	104,23	0,1771	2,23687	2,66	Kvarts
42,4576	255,57	0,2880	2,12735	6,51	Kvarts

10.21 KOIS-8

<i>Prøve:</i>	KOIS-8
<i>Litologi:</i>	Kremgul sandstein, logg 2
<i>GPS:</i>	S: -31 08.758 Ø: 026 36.862
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en lys kremgul og finkornet sandstein med svake tegn på lagning. Den inneholder gule forvittringssoner på ca. 4 mm, som er omgitt av et svart belegg.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, kalifeltspat og albitt (SEM)

Aksessorier (detrialt): rutil, biotitt, muskovitt, zirkon, apatitt, jernoksid og ilmenitt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts, plagioklas, kalifeltspat og albitt (SEM)

Autigene mineraler: albitt, kvarts, kalifeltspat, illitt, kloritt og apatitt (aksessorisk) (SEM)

Kornstørrelse: ca 0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende og tangentielle kornkontakter, svak kompaksjon (SEM)

Sortering: god sortering (SEM)

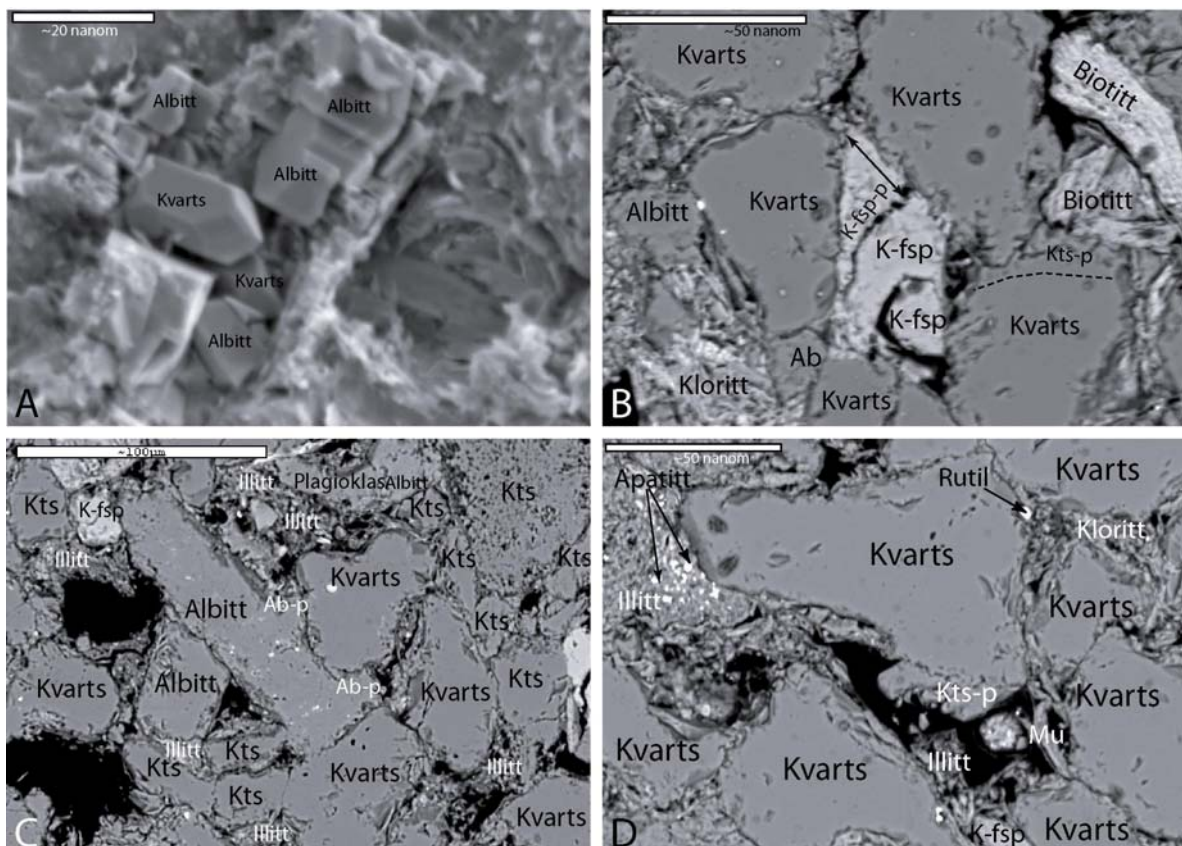
Rundhet: meget kantete (SEM)

Dagens porøsitet: ca. 7 % (SEM-kartlegging). Det meste er primær porøsitet, dog noe oppløsning av hovedsaklig detrialt og autigen albitt og litt oppløsning av kvarts har forårsaket sekundær porøsitet.

Bevaring: Prøven er meget forvitret, og det er vanskelig å finne de diagenetiske forholdene.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.17):

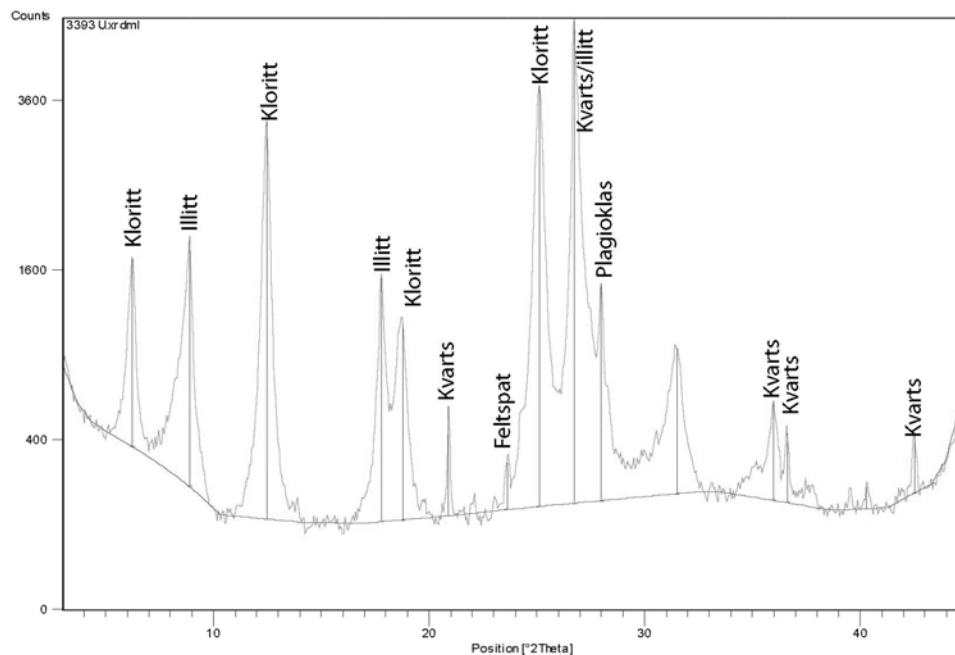
Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på detriale korn av kalifeltspat, og det virker som et porefyllende materiale. Det er forholdsvis en liten andel av det autigene som består av kalifeltspat, og det lyktes ikke å finne autigen kalifeltspat som grenser til andre autigene faser. Derfor er det vanskelig å bestemme den diagenetiske rekkefølgen for autigen kalifeltspat. Autigen albitt forekommer både som anhedrale og euhedrale påvekster på detriale korn av albitt. Autigen albitt virker i stor grad som et porefyllende materiale. Autigen kvarts forekommer også som både anhedrale og euhedrale påvekster på detriale korn av kvarts. Autigen kvarts virker også som et porefyllende materiale. Fra stubber på SEM er det observert euhedrale krystaller av albitt og kvarts om hverandre i porerom. Veksten av albitt og kvarts har dermed vokst omtrent samtidig. Autigen illitt forekommer i trådform som et porefyllende materiale og omslutter autigene påvekster av kvarts og albitt, og postdaterer dermed autigen vekst av albitt og kvarts. Stedvis er det observert apatitt inni mellom denne porefyllende illitten som indikerer at apatitten (aksessorisk) er autigen og ble felt ut omtrent samtidig med illitten.



Figur 10.17: Petrografibilder fra prøve KO1S-8: **A:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale krystaller av albitt og kvarts om hverandre i porerom. **B:** BSE-bilde som viser porefyllende kalifeltspatpåvekst. **C:** BSE-bilde som viser hvordan autigen albitt virker som et porefyllende materiale og omslutter et detrialt kvartskorn. **D:** BSE-bilde som viser hvordan trådformet illitt fyller porene samt hvordan apatitt er fordelt innenfor illitten.

XRD-analyser:

Leirmineraldiffraksjon:



Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2465	1354,00	0,2952	14,14990	28,65	Kloritt
8,8921	1724,34	0,1771	9,94497	36,48	Illitt
12,4776	3189,20	0,3542	7,09412	67,48	Kloritt
17,7883	1459,23	0,2362	4,98634	30,88	Illitt
18,7818	1015,21	0,4133	4,72476	21,48	Kloritt
20,9144	447,31	0,1771	4,24756	9,46	Kvarts
23,6189	159,85	0,1771	3,76696	3,38	Feltspat
25,1221	3657,92	0,4723	3,54486	77,40	Kloritt
26,7277	4726,17	0,2362	3,33545	100,00	Kvarts/illitt
27,9830	1315,66	0,1771	3,18862	27,84	Plagioklas
31,5150	756,10	0,4133	2,83885	16,00	
35,9794	438,39	0,2952	2,49619	9,28	
36,6076	272,64	0,1771	2,45478	5,77	Kvarts
40,3009	64,66	0,3542	2,23793	1,37	Kvarts
42,5163	244,10	0,2160	2,12455	5,16	Kvarts

10.22 KOIS-32

<i>Prøve:</i>	KOIS-32
<i>Litologi:</i>	Kremgul sandstein, sidebergart til Witkop I
<i>GPS:</i>	S: -31 08.611 Ø: 026 36.974
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul og massiv finkornet sandstein. Den inneholder stjerneformede områder med noe svart materiale i tillegg til sirkulære og avlange områder med noe brunt materiale.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat (SEM)

Aksessorier (detritale): biotitt, muskovitt, rutil, zirkon og ilmenitt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts, albitt, kalifeltspat og biotitt (SEM)

Autigene mineraler: kvarts, albitt, kalifeltspat, illitt (SEM) og kloritt (XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,12 mm, finkornet finsand (SEM)

Sortering: god sortering (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: tangentielle og lange kornkontakter, moderat kompaksjon (SEM)

Rundhet: kantete (SEM)

Porøsitet: ca. 11 % (SEM-kartlegging), det meste er primær. Noe sekundær porøsitet forårsaket av oppløsning av kalifeltspat.

Klast:

Størrelse: ca. 0,42 mm (SEM)

Mineraler: albitt, kvarts og rutil (SEM)

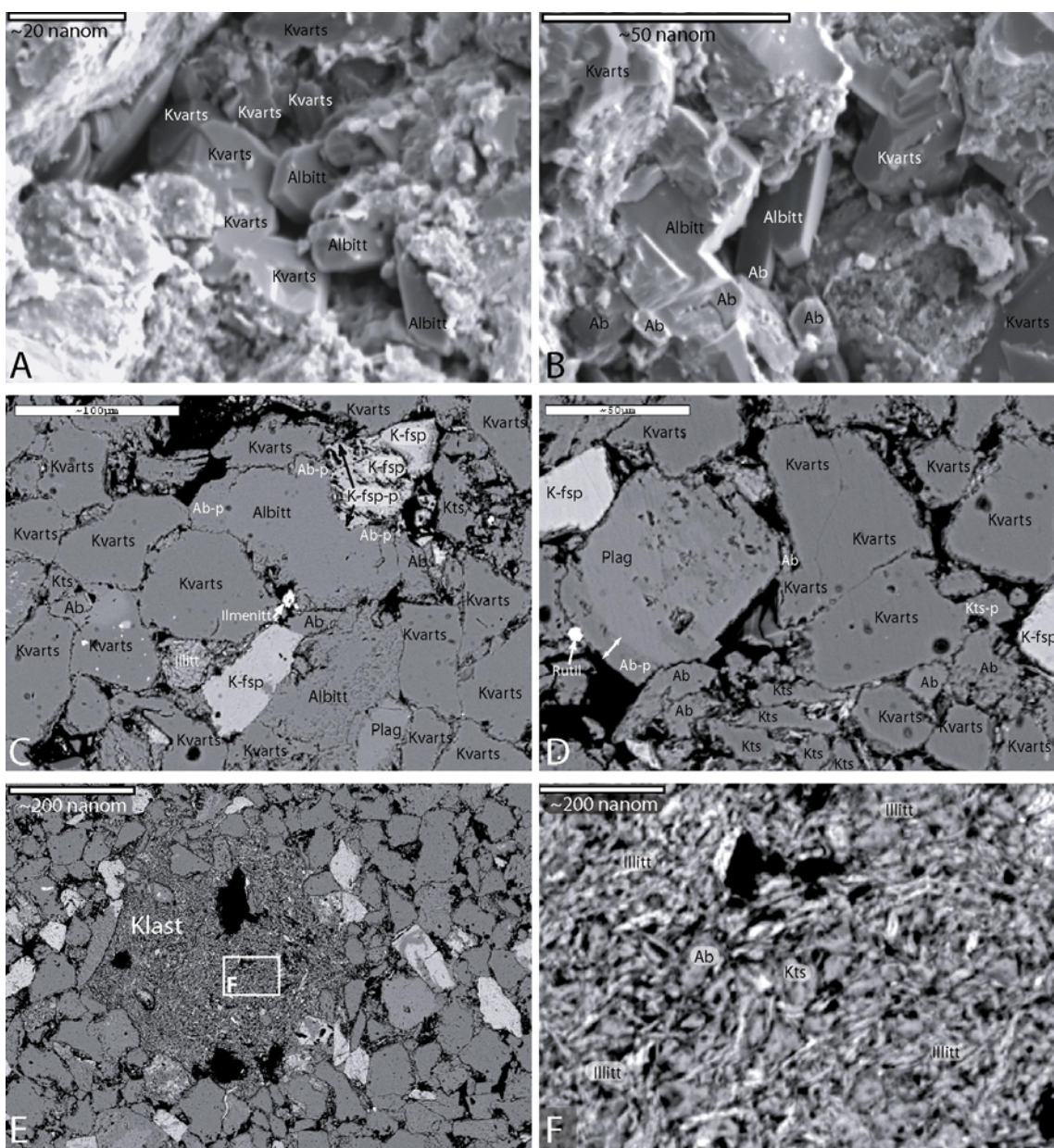
Matriks: illitt og kloritt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,06 mm, grovsilt (SEM)

Sortering: meget dårlig (SEM)

Kornkontakt: flytende, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: meget kantete (SEM)



Figur 10.18: SEM-bilder fra prøve KO1S-32. **A** og **B:** SEI-bilder som viser euhedrale flater av autigen albitt og kvarts som ligger om hverandre i porerom. **C:** BSE-bilde som viser hvordan autigen kalifeltspat har vokst i forhold til autigen albitt. Den autigene albittpåveksten omslutter både detriale og autigene faser av kalifeltspat. **D:** BSE-bilde som viser autigen albitt på et detrialt plagioklaskorn. **E:** BSE-bilde som viser en leireklast **F:** BSE-bilde som er et nærbilde av klasten vist i E. Albitt- og kvartskorn ligger flytende i en masse bestående av illitt.

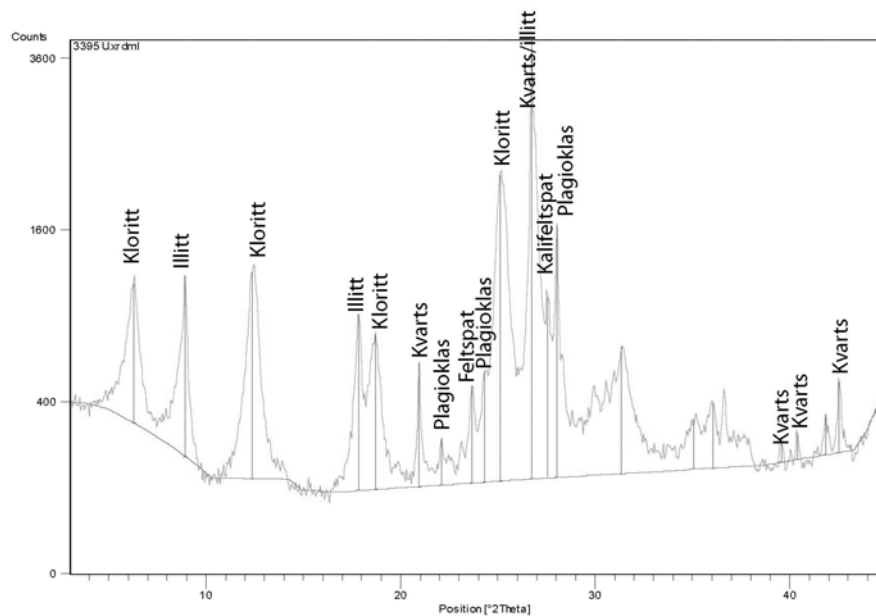
Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.18):

Autigen kalifeltspat opptrer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn, og stedvis virker det som et porefyllende materiale. Autigen albitt opptrer som både anhedrale og euhedrale påvekster på detriale korn av albitt eller plagioklas. Den autigene albitten virker også som et porefyllende materiale og er observert å omslutte autigene kalifeltspatpåvekster. Autigen kalifeltspat predaterer derfor den autigene albitten. Autigen kvarts opptrer som både anhedrale og euhedrale påvekster på detriale kvartskorn. Euhedrale krystaller av kvarts og albitt ligger vekselvis om hverandre i porerom og har dermed vokst omtrent samtidig. Autigen illitt forekommer i trådform som et belegg rundt detriale og autigene faser av kalifeltspat, kvarts,

albitt og plagioklas. Det er ikke observert autigen kloritt i prøven på SEM, dog XRD-dataene indikerer at kloritt er tilstede.

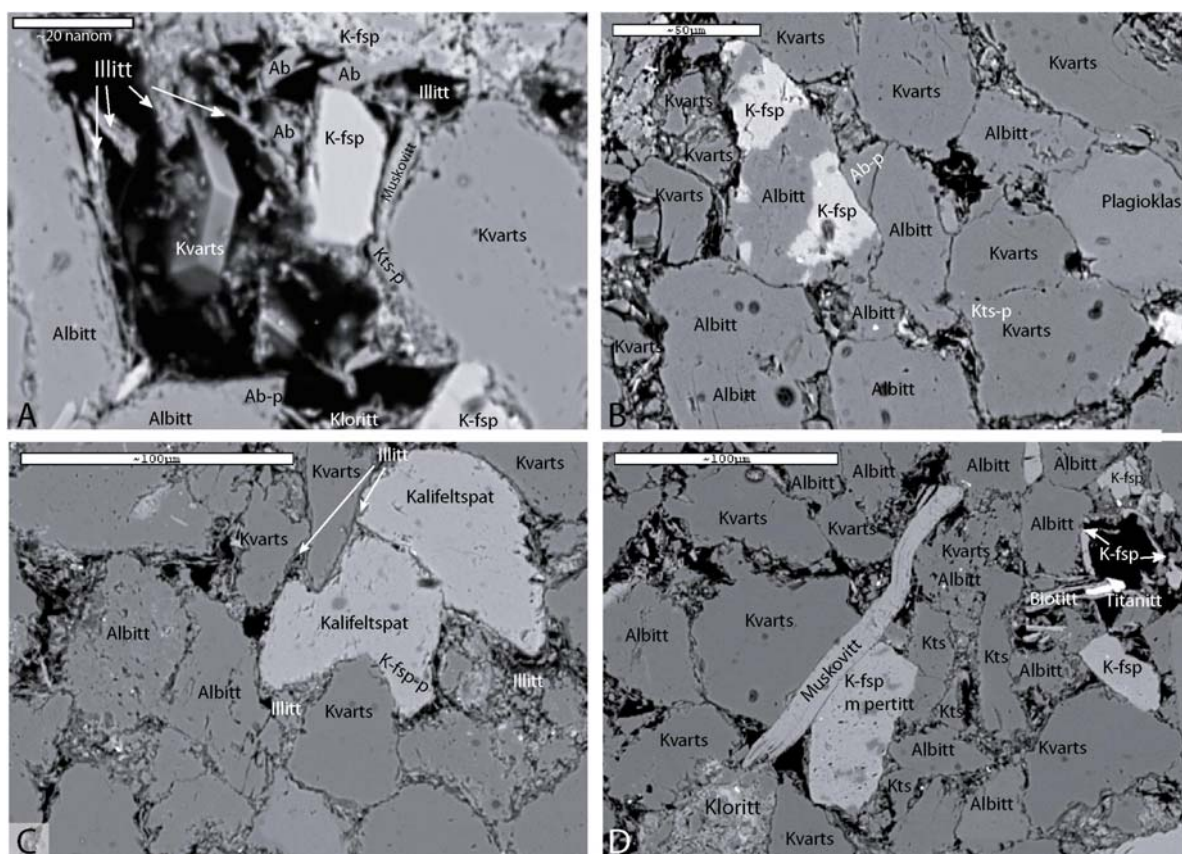
XRD-analyser:

Leirmineraldiffraksjon:



Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2725	830,52	0,3542	14,09124	21,82	Kloritt
8,9337	1009,33	0,2362	9,89877	26,51	Illitt
12,3942	1106,96	0,4723	7,14165	29,08	Kloritt
17,8510	816,02	0,2362	4,96898	21,44	Illitt
18,7030	692,35	0,4723	4,74451	18,19	Kloritt
20,9521	501,63	0,1771	4,24001	13,18	Kvarv
22,1086	141,03	0,1771	4,02076	3,70	Plagioklas
23,6752	368,19	0,2362	3,75813	9,67	Feltspat
24,3141	438,83	0,1771	3,66081	11,53	Plagioklas
25,0986	2034,69	0,5904	3,54814	53,45	Kloritt
26,7482	3806,66	0,2362	3,33294	100,00	Kvarv/illitt
27,4858	3253,06	0,1771	3,24516	14,77	Kalifeltspat
28,0319	1525,26	0,1771	3,18316	40,07	Plagioklas
31,3764	564,52	0,2952	2,85108	14,83	
35,0863	176,52	0,4723	2,55765	4,64	
36,0595	247,71	0,2952	2,49083	6,51	
39,5699	63,70	0,1771	2,27757	1,67	Kvarv
40,3948	89,64	0,1771	2,23294	2,35	Kvarv
41,8588	151,29	0,2362	2,15818	3,97	
42,5507	298,09	0,2160	2,12291	7,83	Kvarv



Figur 10.19: SEM-bilder av prøve KO1S-22. **A:** BSE-bilde som viser euhedral påvekst av kvarts og albitt i et porerom. **B:** BSE-bilde som viser hvordan påvekster av albitt kan virke porefyllende. **C:** BSE-bilde som viser hvordan kalifeltspat-påvekst følger et detrialt kvartskorn. **D:** Et BSE-bilde som viser et muskovittflak som er bøyd.

Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [$^{\circ}$ Th.]	Høyde [cts]	FWHM [$^{\circ}$ Th.]	d-avstand [\AA]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,4648	521,53	0,7085	13,67250	15,25	Kloritt
8,9618	929,07	0,1771	9,86777	27,16	Illitt
12,2860	334,63	0,9446	7,20430	9,78	Kloritt
17,8636	683,63	0,2362	4,96551	19,98	Illitt
18,7062	357,29	0,3542	4,74368	10,44	Kloritt
20,9692	503,08	0,1771	4,23658	14,71	Kvarts
22,1368	114,17	0,1771	4,01571	3,34	Plagioklas
23,6812	325,62	0,1771	3,75719	9,52	Feltspat
24,3556	434,55	0,1771	3,65466	12,70	Plagioklas
25,4134	1537,61	0,2952	3,50489	44,95	Kloritt
26,7761	3420,87	0,2362	3,32953	100,00	Kvarts/illitt
27,4920	3273,97	0,1771	3,24443	14,46	Kalifeltspat
28,0499	1494,60	0,2362	3,18116	43,69	Plagioklas
29,9955	260,46	0,3542	2,97911	7,61	Magnetitt?
31,4265	322,82	0,3542	2,84664	9,44	Kalsitt?
35,2522	131,59	0,7085	2,54599	3,85	Ilmentitt
36,0681	241,13	0,2362	2,49025	7,05	Rutil
36,6595	288,82	0,1771	2,45142	8,44	Kvarts
37,7337	82,89	0,4723	2,38407	2,42	?
39,5876	73,52	0,1771	2,27659	2,15	Kvarts
40,4132	109,54	0,1771	2,23197	3,20	Kvarts
42,5739	267,61	0,2880	2,12181	7,82	Kvarts

10.24 KOIS-6

<i>Prøve:</i>	KOIS-6
<i>Litologi:</i>	Kremgul sandstein, logg 1
<i>GPS:</i>	S: -31 08.887 Ø: 026 37.181
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul og massiv finkornet sandstein. Den inneholder spredte fordelte irregulære former på ca. 1-2 mm, bestående av noe mørkebrunt og violett materiale.

Klassifikasjon: arkose

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat (SEM)

Aksesorier (detriale): biotitt, rutil, ilmentitt og barytt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små detriale korn av kvarts, albitt, kalifeltspat og biotitt (SEM)

Autigene mineraler: kvarts, albitt, kalifeltspat, kloritt og illitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Sortering: god sortering (SEM)

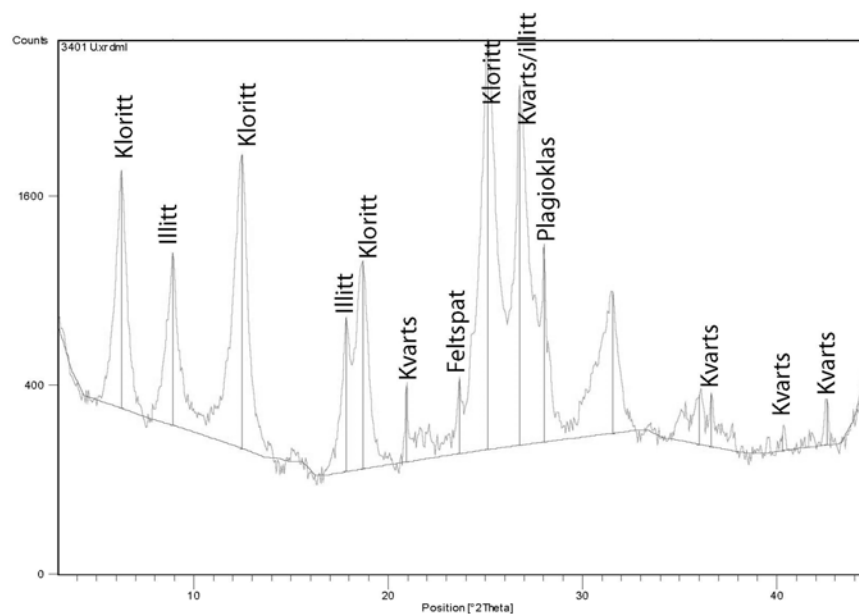
Kornkontakt/kompaksjon: tangentielle og lange kornkontakter, moderat kompaksjon (SEM)

Rundhet: subrundet (SEM)

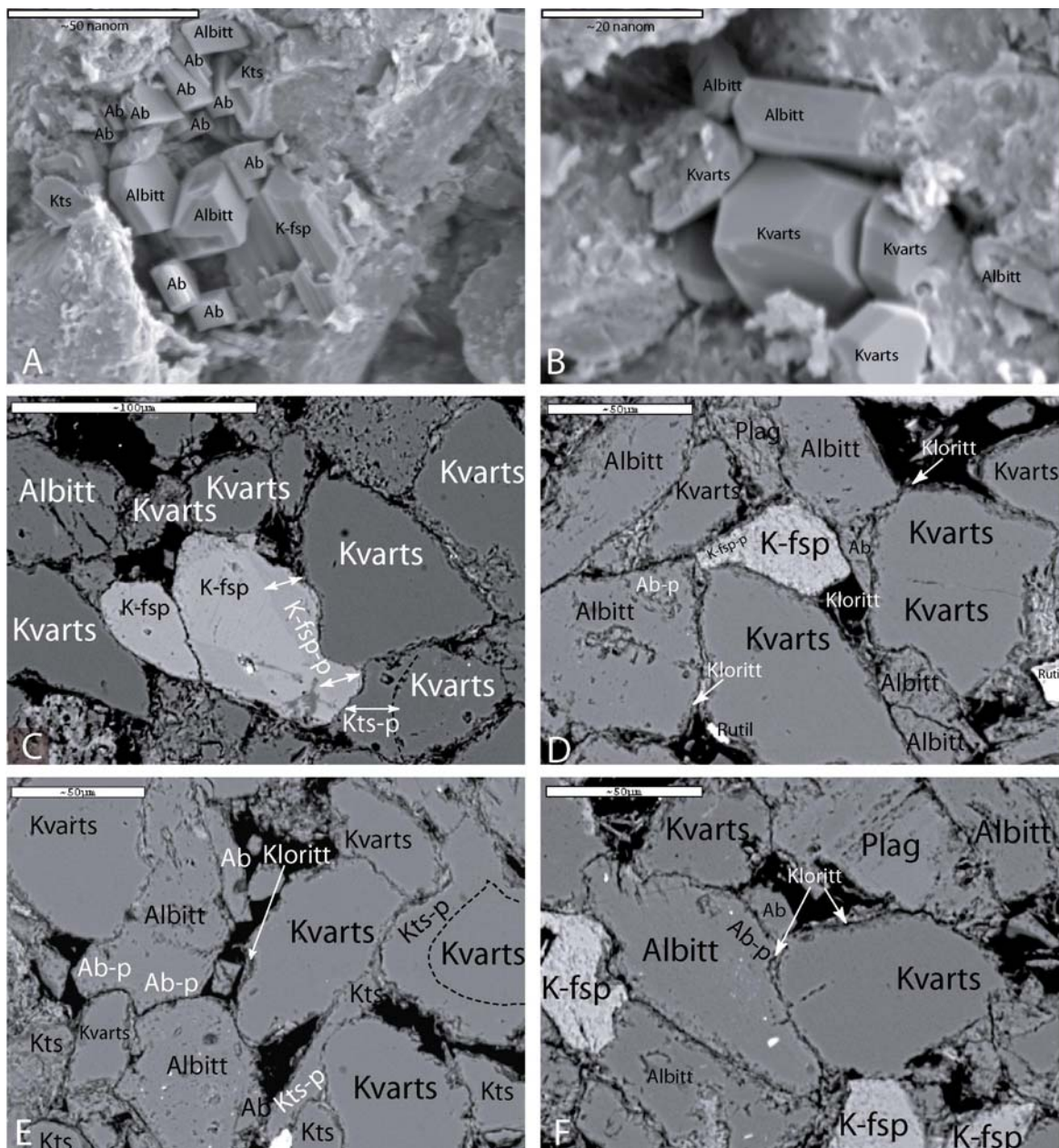
Dagens porøsitet: ca. 12 % (SEM-kartlegging), det meste er primær. Noe sekundær porøsitet forårsaket av oppløsning av detriale og autigene faser av hovedsaklig albitt og i liten grad plagioklas, kvarts og kalifeltspat.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.20):

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekst på detriale kalifeltspatkorn og virker som et porefyllende materiale. Autigene påvekster av kalifeltspat grenser til detriale korn av albitt, plagioklas og kvarts. Autigen kvarts forekommer som både anhedrale og euhedrale påvekster på detriale korn av kvarts, og stedvis virker det porefyllende. Autigen albitt forekommer som påvekster fra detriale korn av albitt og virker som et porefyllende materiale. Autigen albitt forekommer som euhedrale krystaller og er observert å ligge om en annen blant euhedrale kvartskrystaller i porerom. Dermed har den autigene påveksten av kvarts og albitt foregått omtrent samtidig. Både autigene og detriale faser av albitt er siden blitt oppløst slik at det er dannet noe sekundær porøsitet. Noe oppløsning av kalifeltspat og kvarts har også funnet sted.

XRD-analyser:**Leirmineraldiffraksjon:****Toppliste, leirmineraldiffraksjon:**

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2763	1516,06	0,3542	14,08276	49,95	Kloritt
8,9376	903,13	0,2362	9,89446	29,75	Illitt
12,4792	1794,34	0,4133	7,09320	59,11	Kloritt
17,8468	618,76	0,2362	4,97013	20,38	Illitt
18,6890	971,46	0,4723	4,74802	32,00	Kloritt
20,9267	251,35	0,1771	4,24510	8,28	Kvarst
23,6539	266,25	0,2362	3,76147	8,77	Feltspat
25,1230	3035,44	0,4133	3,54475	100,00	Kloritt
26,7566	2493,41	0,3542	3,33191	82,14	Kvarst/illitt
28,0059	1020,33	0,1771	3,18606	33,61	Plagioklas
31,5294	666,29	0,3542	2,83759	21,95	
35,9990	171,77	0,3542	2,49487	5,66	
36,6397	186,76	0,2362	2,45270	6,15	Kvarst
40,2864	46,36	0,3542	2,23870	1,53	Kvarst
42,5581	157,15	0,2160	2,12256	5,18	Kvarst



Figur 10.20: SEM-bilder fra prøve KO1S-6. **A:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale albittkrystaller i et porerom. **B:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale krystaller av kvarts og albitt om hverandre i et porerom. **C:** BSE-bilde som viser de diagenetiske forholdene mellom kalifeltspat og kvarts. Autigen kalifeltspat predaterer autigen kvartsvekst som virker porefyllende. **D:** BSE-bilde som viser de diagenetiske forholdene mellom autigen kalifeltspat og albitt. **E:** BSE-bilde som viser hvordan autigen albitt og kvarts fungerer som porefyllende materialer. **F:** Et BSE-bilde som viser autigen albittvekst, samt et klorittbelegg rundt et detrialt kvartskorn.

10.25 KOIS-12

<i>Prøve:</i>	KOIS-12
<i>Litologi:</i>	Kremgul sandstein, logg 2
<i>GPS:</i>	S: -31 08.776 Ø: 026 36.855
<i>Prepareringstype:</i>	Polert tynnslip med blå epoksy
<i>Innsamlet av:</i>	Siri A. L. Sali
<i>Analysert av:</i>	Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul, massiv og finkornet sandstein. Den inneholder spredt fordelte irregulære former på ca. 1-2 mm, bestående av noe mørkebrunt, svart og grått materiale.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat (SEM)

Aksessorier (detriale): biotitt, muskovitt, rutil, ilmentitt og barytt (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små detriale korn av kvarts, albitt, kalifeltspat og rutil (SEM), illitt og kloritt (XRD)

Autigene mineraler: kvarts, albitt og illitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,1 mm, finkornet finsand (SEM)

Sortering: god sortering (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: tangentielle og lange kornkontakter, moderat kompaksjon (SEM)

Rundhet: subkantete (SEM)

Dagens porøsitet: ca. 10 % (SEM-kartlegging), der det meste er primær. Noe sekundær porøsitet forekommer pga. oppløsning av detriale og autigene faser av hovedsaklig albitt og kalifeltspat og i liten grad plagioklas og kvarts.

Klast:

Størrelse: ca. 0,27 mm lang

Mineraler: kvarts og albitt

Matriks: ca. 70 %, bestående av biotitt

Kornstørrelse: ca. 0,01 mm.

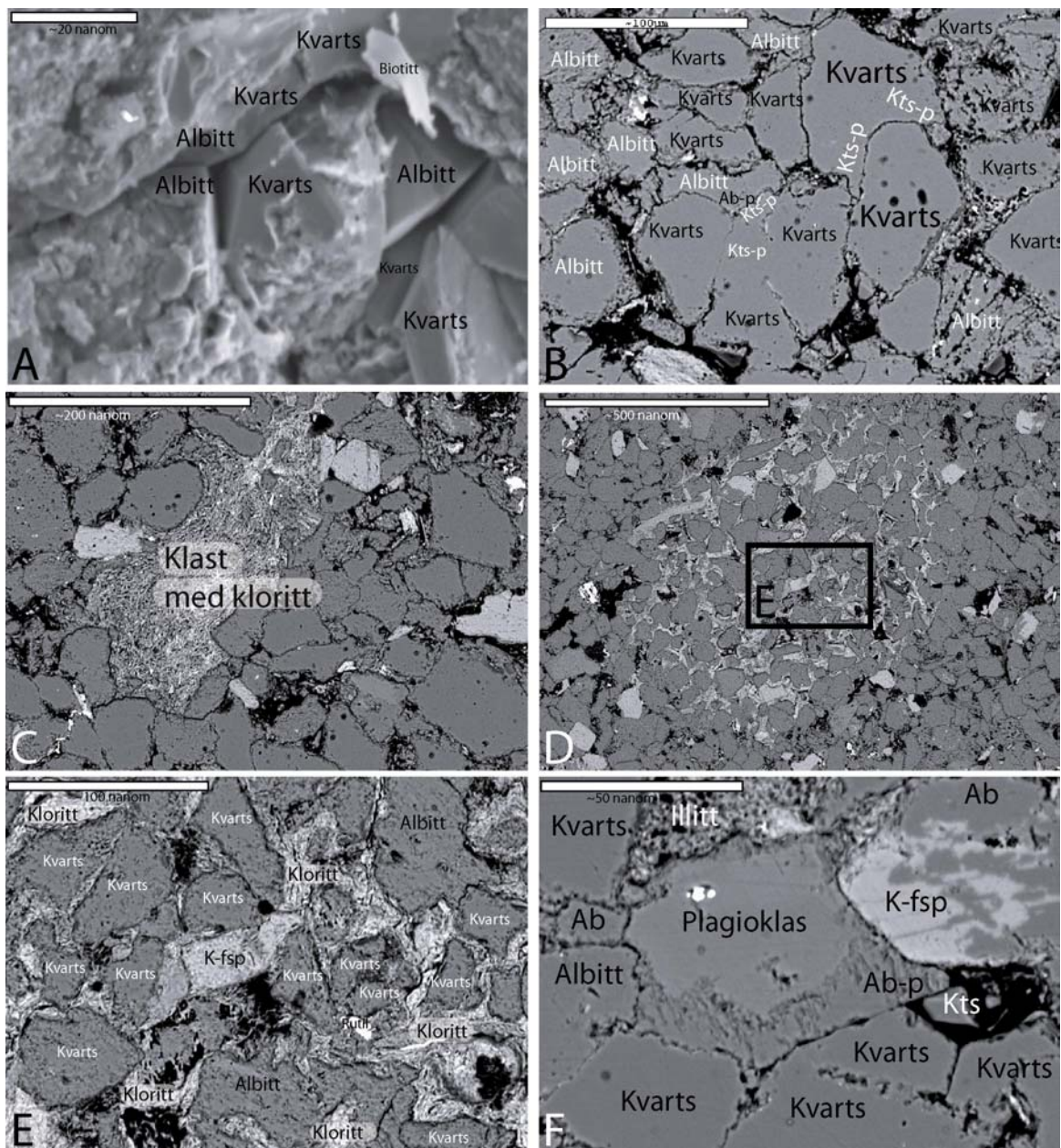
Sortering: meget dårlig

Kornkontakt: flytende, svak kompaksjon

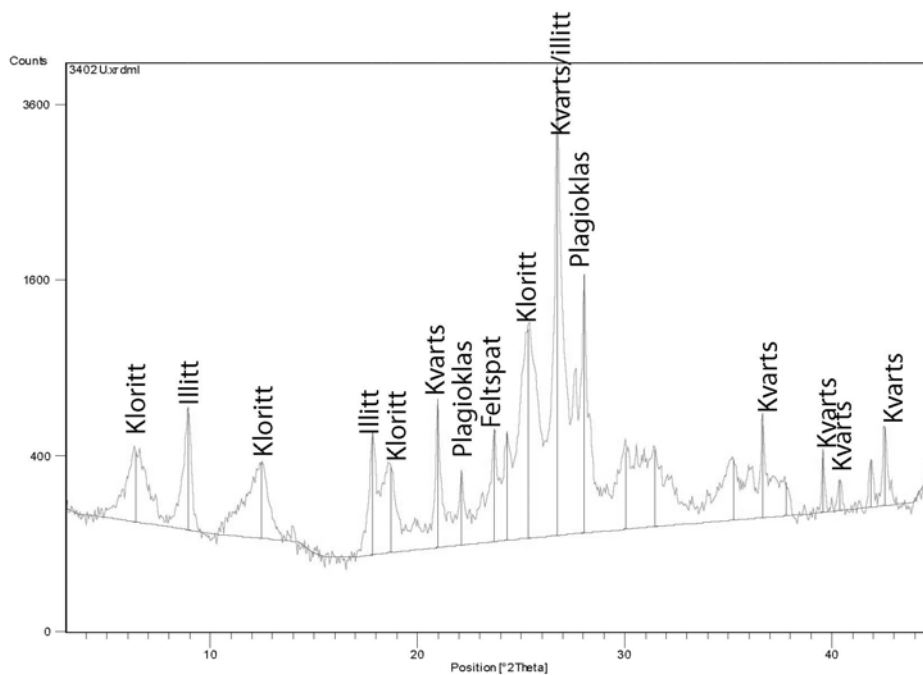
Rundhet: meget kantete

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.21):

Autigen kalifeltspat er ikke observert. Autigen albitt forekommer som påvekster på detriale albitt- og plagioklaskorn. Det forekommer både som et porefyllende materiale og i euhedrale krystallformer. Autigen kvarts forekommer som påvekster på detriale kvartskorn og ligger vekselvis med euhedrale albittkrystaller i porerom. Veksten av albitt og kvarts har derfor foregått omtrent samtidig. Autigen kvarts og albitt forekommer som porefyllende materialer. Autigen illitt forekommer i trådform, og er også et porefyllende materiale. Dette er ikke gjennomgående i hele prøven, og det ligger heller mer i spredte soner.



Figur 10.21: SEM-bilder av prøve KOIS-12. **A:** SEI-bilde av stubb som viser hvordan euhedrale krystaller av kvarts og albitt vekselvis fyller porerom. **B:** BSE-bilde som viser hvordan autigene påvekster av kvarts og albitt virker porefyllende. **C:** BSE-bilde som viser en klast som består av kloritt i grunnmassen. **D:** BSE-bilde som viser en sone med porefyllende kloritt. **E:** Et BSE-bilde som er et nærbilde av D. **F:** BSE-bilde som viser autigen albitt og porefyllende illitt.

XRD-analyser:**Leirmineraldiffraksjon:****Toppliste, leirmineraldiffraksjon:**

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,3897	264,41	0,5904	13,83294	6,33	Kloritt
8,9276	517,57	0,2362	9,90547	12,40	Illitt
12,4681	257,35	0,5904	7,09949	6,16	Kloritt
17,8391	442,98	0,1771	4,97228	10,61	Illitt
18,7057	271,68	0,3542	4,74382	6,51	Kloritt
20,9660	610,22	0,2362	4,23722	14,62	Kvarts
22,1234	240,08	0,1771	4,01811	5,75	Plagioklas
23,7068	429,74	0,1771	3,75319	10,29	Feltspat
24,3090	406,98	0,2362	3,66157	9,75	
25,3190	1065,97	0,4723	3,51774	25,53	Kloritt
26,7503	4174,77	0,1771	3,33269	100,00	Kvarts/illitt
28,0324	1520,78	0,1771	3,18311	36,43	Plagioklas
30,0877	281,42	0,2362	2,97019	6,74	
31,4678	282,84	0,3542	2,84300	6,78	
35,2411	222,93	0,4723	2,54677	5,34	
36,6504	450,71	0,1771	2,45201	10,80	Kvarts
37,7799	113,39	0,3542	2,38126	2,72	
39,5879	245,93	0,1771	2,27658	5,89	Kvarts
40,3893	108,53	0,1771	2,23323	2,60	Kvarts
41,8941	181,84	0,1771	2,15644	4,36	
42,5571	340,01	0,2160	2,12261	8,14	Kvarts

10.26 KOIS-26

Prøve: KOIS-26
Litologi: Kremgul sandstein, logg 3
GPS: S: -31 08.623 Ø: 026 36.950
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoksy
Innsamlet av: Siri A. L. Sali
Analysert av: Siri A. L. Sali
Andre analyser enn SEM, CL og XRD: $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul og massiv finkornet sandstein. Prøven er tatt fra et lag med en merkverdig forvitringsoverflate som er grov og meget hard og som glinser i sollys. På toppen av dette laget ble det i felt observert utvitrede huler ("pit holes") på ca. 10 cm i diameter. Bergarten inneholder soner med noe svart og violett materiale.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, albitt, plagioklas og kalifeltspat (SEM)

Aksessorier (detriale): biotitt, muskovitt, rutil og zirkon (SEM)

Matriks: ca. 2 %, bestående av små korn av kvarts, albitt og kalifeltspat (SEM)

Autigene mineraler: kvarts, albitt, kalifeltspat, illitt (SEM) og kloritt (XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,14 mm, grovkornet finsand (SEM)

Sortering: god sortering (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende, tangentielle og lange kornkontakter, moderat kompaksjon (SEM)

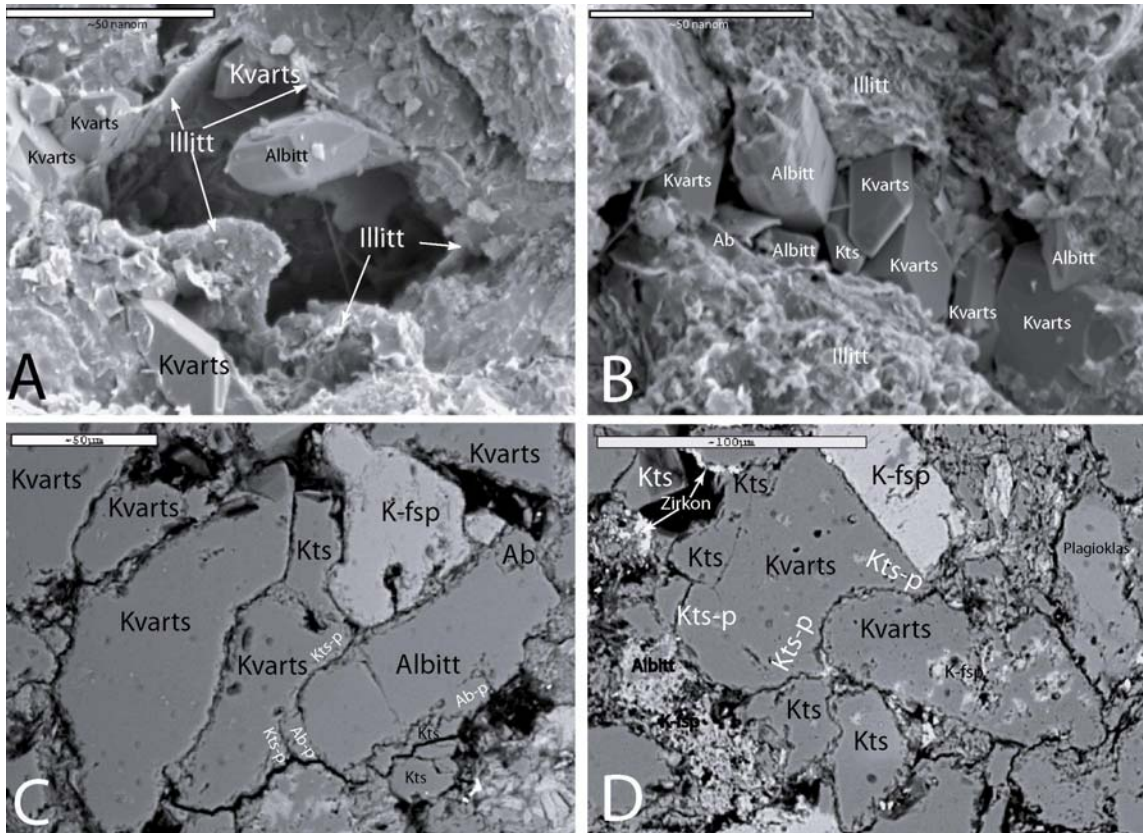
Rundhet: subkantete (SEM)

Dagens porøsitet: ca. 13 % (SEM-kartlegging), det meste er primær. Noe sekundær porøsitet forårsaket oppløsning av detriale og autigene faser av hovedsaklig albitt og kalifeltspat og i liten grad plagioklas og kvarts.

Bevaring: Prøven er meget forvitret slik at noen av de diagenetiske forholdene er kamuflert.

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.22):

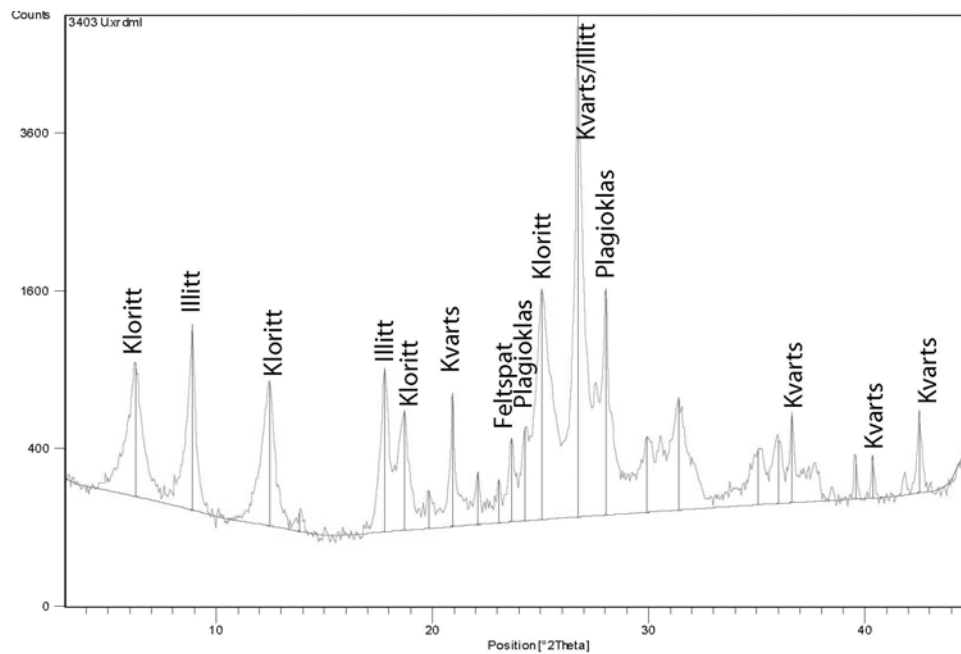
Autigen kalifeltspat forekommer, dog i meget små mengder. Autigen kalifeltspat forekommer som påvekst på detriale kalifeltspat og virker porefyllende. Det er såpass lite autigen kalifeltspat i prøven at det ikke lyktes å finne dets diagenetiske forhold til de andre autigene fasene. Autigen kvarts og albitt forekommer som påvekster på henholdsvis detriale kvarts og albittkorn. Begge disse fasene kan virke som porefyllende materiell, og de forekommer også som euhedrale krystaller som ligger om hverandre i porerommene. Autigen kvarts og albitt ble felt ut omtrent samtidig. Autigen illitt forekommer som belegg på detriale og autigene faser. Kloritt er ikke observert på SEM, dog XRD-dataene tilsier at det er tilstede i prøven. Prøven er noe forvitret og både detriale og autigene faser av kvarts, albitt og kalifeltspat er litt oppløst.



Figur 10.22: SEM-bilder av prøve KO1S-26. **A:** SEI-bilde av stubb som viser hvordan autigen illitt ligger som et belegg rundt en pore. Det viser også hvordan euhedrale krystaller av kvarts og albitt har vokst innover i poren. **B:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale krystaller av kvarts og albitt om hverandre i et porerom. **C:** BSE-bilde som viser hvordan autigen albitt har vokst på et detrialt albittkorn og hvordan autigen kvarts har vokst på et detrialt kvartskorn. **D:** BSE-bilde som viser hvordan autigen kvarts kan virke porefyllende.

XRD-analyser:

Leirmineraldiffraksjon:



Toppliste, leirinealdiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
6,2634	755,87	0,2952	14,11165	13,69	Kloritt
8,9002	1126,25	0,2362	9,93591	20,40	Illitt
12,4787	710,12	0,4133	7,09349	12,86	Kloritt
13,8748	49,43	0,3542	6,38272	0,90	
17,8123	823,07	0,2362	4,97968	14,91	Illitt
18,6925	520,74	0,2952	4,74714	9,43	Kloritt
19,8536	112,61	0,3542	4,47206	2,04	
20,9302	631,50	0,1771	4,24439	11,44	Kvarts
22,1016	181,47	0,1771	4,02201	3,29	
23,0590	144,58	0,1771	3,85715	2,62	
23,6508	339,78	0,2362	3,76196	6,16	Feltspat
24,2799	391,02	0,2362	3,66588	7,08	Plagioklas
25,0731	1496,80	0,2952	3,55168	27,12	Kloritt
26,7335	5519,89	0,2362	3,33475	100,00	Kvarts/illitt
28,0068	1490,81	0,1771	3,18596	27,01	Plagioklas
29,9213	320,08	0,2952	2,98632	5,80	
31,3957	551,78	0,4133	2,84937	10,00	
35,0764	221,78	0,4723	2,55835	4,02	
36,0071	273,52	0,2952	2,49433	4,96	
36,6390	427,56	0,2362	2,45275	7,75	Kvarts
39,5652	177,67	0,1771	2,27783	3,22	
40,3686	175,63	0,1771	2,23433	3,18	Kvarts
42,5232	405,85	0,2160	2,12422	7,35	Kvarts

10.27 Andre ventkomplekser

To prøver er innsamlet fra to forskjellige ventkomplekser som ligger i nærheten av Witkop I. Begge prøvene er kremgule sandsteiner. KO3HS-25 kommer fra Modena I, mens KO3HS-26 kommer fra Modena II.

10.28 KO3HS-25

Prøve: **KO3HS-25**
Litologi: Modena I, ventsandstein
GPS: S: -31 08' 52.06711" Ø: 26 36' 06.61091"
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoksy
Innsamlet av: Henrik Svensen
Analysert av: Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul og porøs sandstein med mørke grå klaster.

Klassifikasjon: arkose (SEM)

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, kalifeltspat og albitt (SEM)

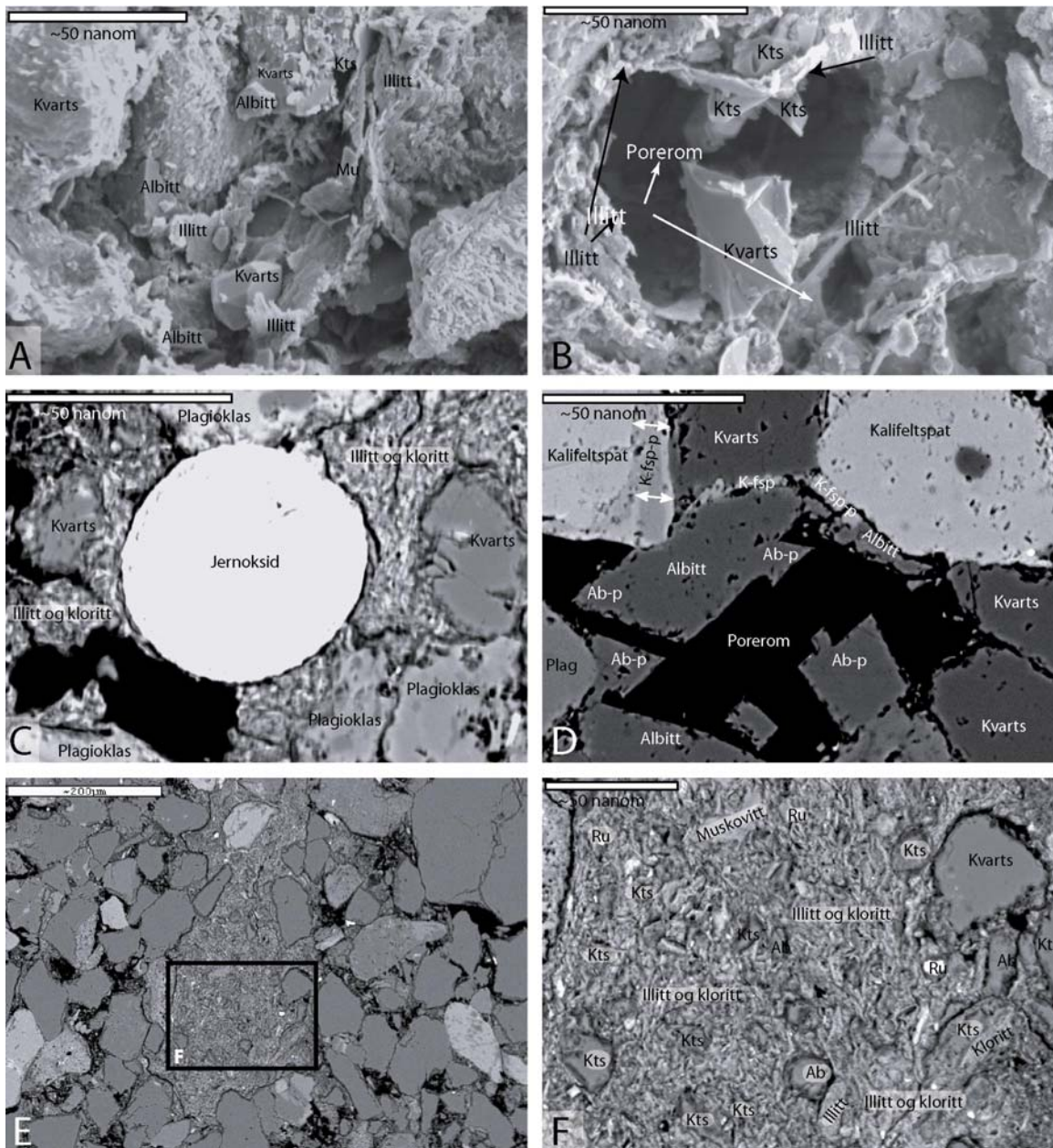
Aksessorier (detritale): rutil, biotitt, muskovitt, jernoksider og zirkon (SEM)

Matriks: ca. 5 %, bestående av små korn av kvarts, plagioklas, kalifeltspat og albitt (SEM-kartlegging)

Autigene mineraler: albitt, kvarts, kalifeltspat, illitt (SEM) og kloritt (XRD)

Kornstørrelse: ca. 0,16 mm, grovkornet finsand (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: tangentielle kornkontakter, svak-moderat kompaksjon (SEM)



Figur 10.23: SEM-bilder fra prøven KO3HS-25. **A:** SEI-bilde som viser hvordan autigen albitt og kvarts har vokst i euhedrale former i porerom. **B:** SEI-bilde som viser et porerom som er omringet av et illittbelegg. Noen euhedrale kvartskrystaller har klart å vokse igjennom dette belegget. **C:** BSE-bilde som viser et trillrundt jernoksid, antas å være detritalt. Illitt fyller porerommene. **D:** BSE-bilde som viser euhedrale albittkorn som har vokst fra plagioklas og albittkorn inn mot en åpen pore. **E:** BSE-bilde som viser en leirklast. **F:** BSE-bilde over innholdet i klasten fra E. Klasten inneholder kvarts-, albitt- og muskovittkorn som ligger flytende i en matriks bestående av illitt og kloritt.

Toppliste, leirmineraldiffraksjon:

Pos. [°2Th.]	Høyde[cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
3,1828	1045,28	0,3542	27,76005	17,12	
6,3768	688,24	0,2362	13,86092	11,27	Kloritt
8,9002	1425,12	0,2362	9,93593	23,34	illitt
12,5576	3606,01	0,2362	7,04914	59,05	Kloritt
17,8046	1178,66	0,2362	4,98181	19,30	Illitt
18,8399	481,42	0,2952	4,71032	7,88	Kloritt
20,9070	1571,58	0,2362	4,24905	25,73	Kvarts
23,5921	156,87	0,2362	3,77118	2,57	Feltspat
25,2462	4185,00	0,2362	3,52772	68,53	Kloritt
26,7003	6107,19	0,1771	3,33881	100,00	Kvarts/illitt
27,4735	2252,11	0,1771	3,24658	9,45	Kalifeltspat
28,0015	1009,20	0,1771	3,18655	16,52	Plagioklas
29,4900	383,44	0,1771	3,02901	6,28	Kalsitt
31,6299	269,57	0,3542	2,82880	4,41	Kalsitt
35,9797	297,72	0,2952	2,49617	4,87	Kalsitt
36,5990	835,63	0,1771	2,45534	13,68	Kvarts
39,5255	198,67	0,1771	2,28003	3,25	Kvarts
40,3513	222,84	0,1771	2,23525	3,65	Kvarts
42,5055	603,48	0,2160	2,12506	9,88	Kvarts

10.29 KO3H-26

Prøve: KO3HS-26
Litologi: Modena II, ventsandstein
GPS: S: -31 09' 11.80810" Ø: 26 36' 09.74306"
Prepareringstype: Polert tynnslip med blå epoksy
Innsamlet av: Henrik Svensen
Analysert av: Siri A. L. Sali

Beskrivelse av prøven i håndstykket: Dette er en kremgul og porøs sandstein med mørkegråe klaster.

Klassifikasjon: arkose

Bergartsdannende mineraler: kvarts, plagioklas, kalifeltspat og albitt i tillegg er det bergartsfragmenter bestående av kvarts og kalifeltspat (SEM)

Aksessorier (detriale): rutil, biotitt, muskovitt, jernoksider og zirkon (SEM)

Matriks: ca. 5 %, bestående av små korn av kvarts, plagioklas, kalifeltspat og albitt (SEM-kartlegging)

Autigene mineraler: albitt, kvarts, kalifeltspat, illitt og kloritt (SEM)

Kornstørrelse: største korn er ca. 0,7 mm, mens de fleste kornene ligger på ca. 0,25 mm.

Finkornet grovsand (SEM)

Kornkontakt/kompaksjon: flytende, tangentielle og lange kornkontakter, moderat kompaksjon (SEM)

Sortering: moderat sortert (SEM)

Rundhet: subkantete (SEM)

Dagens porøsitet: ca. 8 % (SEM-kartlegging). Det meste er primær porøsitet, dog noe oppløsning av detriale kalifeltspatkornog bergartsfragmenter bestående av kvarts og kalifeltspat har forårsaket sekundær porøsitet.

Klast 1:

Størrelse: ca. 0,5 mm (SEM)

Mineraler: kvarts, albitt, kalifeltspat, jernoksider og rutil (SEM)

Matriks: ca. 70 %, bestående av illitt og biotitt (SEM)

Kornstørrelse: ca. 0,01 (SEM)

Sortering: dårlig (SEM)

Kornkontakt: flytende, svak kompaksjon (SEM)

Rundhet: subrundet (SEM)

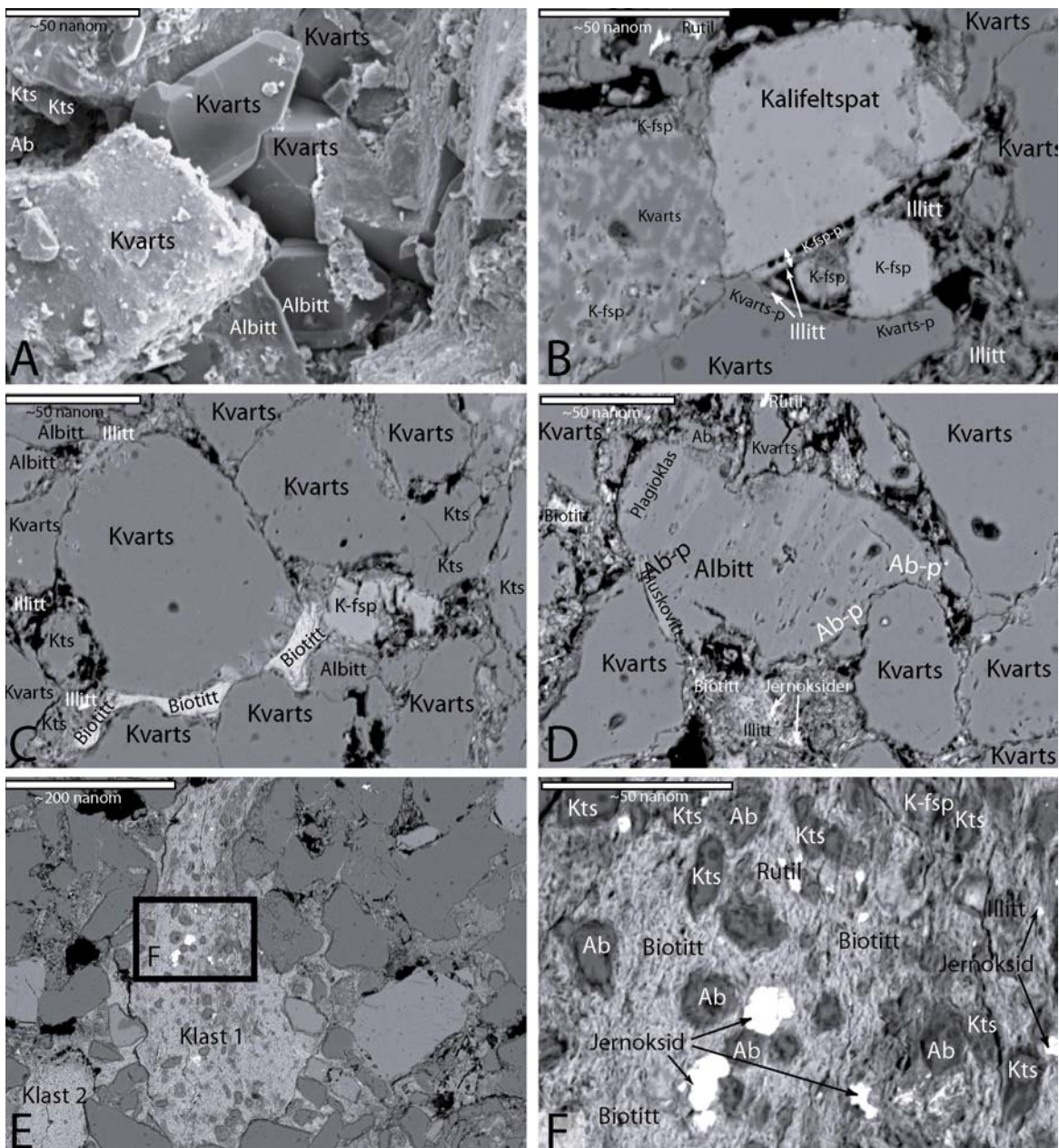
Klast 2:

Størrelse: ca. 0,2 mm (SEM)

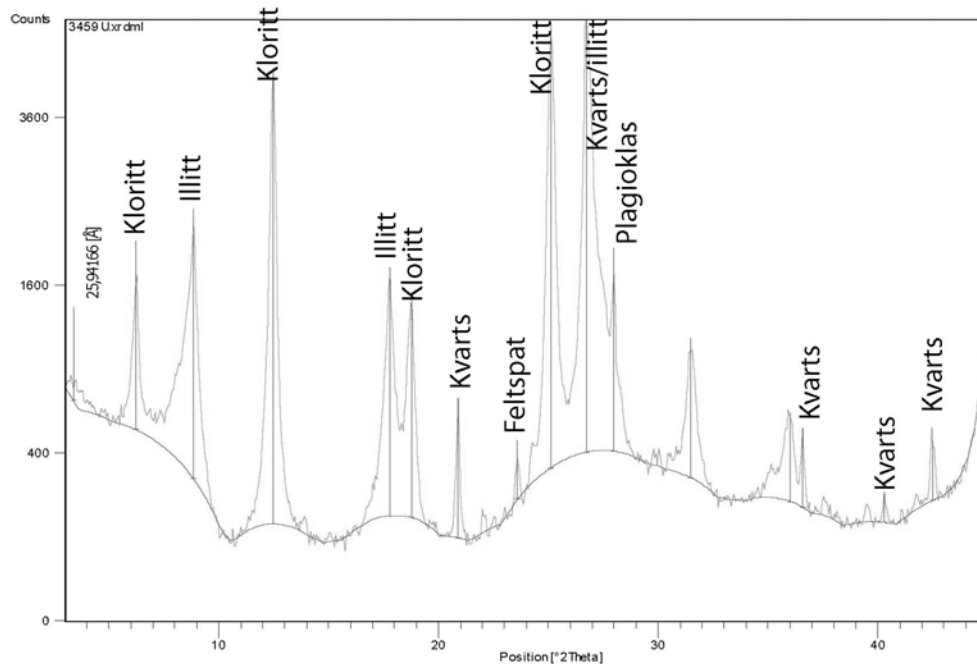
Matriks: ca. 100 %, bestående av biotitt (SEM)

Teksturbeskrivelse (SEM) (figur 10.24):

Autigen kalifeltspat forekommer som påvekster på detriale kalifeltspatkorn og kan virke som et porefyllende materiale. Noen av kalifeltspatpåvekstene inneholder også litt Na. Autigen illitt forekommer i trådform som et belegg rundt autigene faser av kalifeltspat. Både detriale og autigen kalifeltspat har blitt noe oppløst etter utfellingen av illittbelegget slik at noe sekundær porøsitet er dannet. Autigen kvarts forekommer som påvekster på detriale kvartskorn og virker som et porefyllende materiale. Det grenser til illittbelegg som omslutter kalifeltspat eller porerom med resterende kalifeltspat. Autigen kvarts postdaterer dermed vekst av kalifeltspat og illittbelegg. Autigen kvarts forekommer også i euhedrale krystaller sammen med euhedrale albittkrystaller i porerom, noe som indikerer at de har vokst omtrent samtidig. Autigen albitt forekommer som anhedrale og euhedrale påvekster på detriale albitt- eller plagioklaskorn. Autigen illitt i trådform virker også som et porefyllende materiale. Det er observert jernoksider blant illitten som fyller porene. Det er mulig at noe jernoksid ble felt ut samtidig med illitten. Porefyllende illitt grenser til både detriale og autigene faser av kvarts, kalifeltspat og albitt. Stedvis ligger illitt midt i en pore som en pseudomorf etter et detrialt korn, kanskje kalifeltspat, i stedet for å legge seg etter poreveggen. Autigen kloritt forekommer i trådform som et porefyllende materiale som grenser til illittbelegg som omslutter detriale kalifeltspatkorn. Det lyktes ikke å finne de diagenetiske forholdene mellom porefyllende illitt og porefyllende kloritt.



Figur 10.24: Petrografibilder av prøve KO3HS-26 fra Modena II. **A:** SEI-bilde av stubb som viser euhedrale krystaller av kvarts og albitt om hverandre i porerom. **B:** BE-bilde som viser autigen kalifeltspatpåvekst som er omringet av et illittbelegg som igjen er omringet av kvartspåvekst. **C:** BE-bilde som viser porefyllende biotitt. **D:** BE-bilde som viser autigen albitt som omringer et detrialt kvartskorn, samt jernoksider som ligger blant porefyllende illitt. **E:** BE-bilde som viser kluster i prøven. Klast 1 er vist i F, mens klast 2 kun består av biotitt. **F:** BE-bilde som er et nærbilde av klast 1 fra E. Klasten består av albitt-, kvarts- og kalifeltspatkorn med jernoksider og rutil liggende i en matriks bestående av biotitt og illitt.

XRD-analyser:**Leirmineraldiffraksjon:****Toppliste, leirmineraldiffraksjon:**

Pos. [°2Th.]	Høyde [cts]	FWHM [°2Th.]	d-avstand [Å]	Rel. Int. [%]	Mineral
3,4059	702,81	0,7085	25,94166	13,97	
6,2394	1532,86	0,1771	14,16584	30,46	Kloritt
8,8696	2132,96	0,2362	9,97018	42,39	Illitt
12,4875	4211,85	0,2952	7,08854	83,70	Kloritt
17,7818	1618,12	0,2362	4,98816	32,16	Illitt
18,7642	1338,52	0,2362	4,72916	26,60	Kloritt
20,8858	608,68	0,1771	4,25331	12,10	Kwarts
23,5814	251,74	0,2362	3,77287	5,00	Feltspat
25,1247	4769,30	0,2952	3,54451	94,78	Kloritt
26,7188	5032,06	0,3542	3,33655	100,00	Kwarts/illitt
27,9716	1567,55	0,1771	3,18989	31,15	Plagioklas
31,4862	842,30	0,3542	2,84138	16,74	
36,0031	413,01	0,3542	2,49460	8,21	
36,5862	347,44	0,1771	2,45617	6,90	Kwarts
40,3036	92,69	0,1771	2,23779	1,84	Kwarts
42,4863	252,73	0,2160	2,12598	5,02	Kwarts

10.30 Prøvebeskrivelser

Prøvenummer:	Lokalitet:	GPS-koordinater:	Beskrivelse i håndstykket:	Analyser
KO1S-2	Logg 1	S: 31 08.876 Ø: 026 37.167	Dette er en kalsittåre med godt utviklede krystaller med romboedriske kløv. Kalsittåren ligger i en kremgul massiv sandstein.	OM og CL for $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.
KO1S-4	Logg 1	S: 31 08.874 Ø: 026 37.159	Dette er en kremgul og massiv sandstein med antydning på lagning. Små svarte korn er spredt i hele prøven.	
KO1S-5	Logg 1	S: 31 08.898 Ø: 026 37.189	Dette er en kremgul sandstein med hvite korn i matriksen. Den inneholder soner som likner på utfellinger med ulike farger; gulhvitt og mørke brun. Prøven har en irregulær forvitringsoverflate som er glinsende og reflekterende i sollys.	
KO1S-7	Logg 2	S: -31 08.708 Ø: 026036.876	Dette er en rød silstein med lagning. Den er tatt fra den nederste enheten fra logg 2. som er skifrig og inneholder partier med lysere områder som består av kalsitt.	CL og SEM. Prøven ble "brent" under CL, slik at SEM-analysene ble dårlige.
KO1S-9	Logg 2	S: 31 08.760 Ø: 026 36.857	Dette er en kremgul og massiv sandstein med brune, violette og svarte soner som likner utfellingssoner. Prøven inneholder avlange leireklaster opp til 7 cm lange.	
KO1S-10	Logg 2	S: 31 08.759 Ø: 026 36.856	Dette er en kremgul og massiv sandstein som inneholder usorterte og avlange leireklaster, opp til 2 cm lange. Matriksen inneholder kalsitt.	OM og CL for $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.
KO1S-11	Logg 2	S: 31 08.773 Ø: 026 36.866	Dette er en kremgul sandstein med soner av svart materiale. Prøven inneholder utvitrede karbonatnoder.	
KO1S-13	Logg 2	S: 31 08.835 Ø: 026 36.868	Dette er en rød og meget finkornet sandstein med lagning. Den inneholder svarte soner som kan være mineralutfellinger.	
KO1S-14	Logg 2	S: 31 08.856 Ø: 026 36.881	Dette er en rød og finkornet sandstein hentet fra samme lag som KO1S-13. Denne prøven inneholder hvite klaster med fossiler (bl.a. ryggvirvel). Denne prøven er noe mer grovere enn KO1S-13.	
KO1S-15	Logg 2	S: 31 08.853 Ø: 026 36.880	Dette er en kremgul og massiv sandstein med svake tegn på lagning. Den inneholder svarte soner som kan være mineralutfellinger, som ligger langs lagningen.	
KO1S-16	Logg 2	S: 31 08.882 Ø: 026 36.875	Dette er en hvitgul, massiv og medium kornet sandstein med soner av brunfarget materiale, som ser ut som mineralutfellinger.	
KO1S-17	Logg 2	S: 31 08.823 Ø: 026 36.864	Dette er en meget finkornet rødfarget sandstein, som er mer violett i fargen. Den inneholder partier med lysere materiale. Disse sonene er mer gulaktige og brune i fargen.	

Prøvenummer:	Lokalitet:	GPS-koordinater:	Beskrivelse i håndstykket:	Analyser
KO1S-18 A og B	Logg 3	S: 31 08.646 Ø: 026 36.966	Disse prøvene er åreutløp som inneholder kalsitt. De er innhentet fra en overgangssone mellom underliggende rødfarget slambergart og overliggende massiv kremgul sandstein. Denne overgangssonen er en blanding av røde og gråaktige sedimenter.	
KO1S-19	Logg 3	S: 31 08.646 Ø: 026 36.966	Dette er en finkornet, massiv og grå sandstein. Den inneholder noen lysere soner. Prøven er innhentet fra samme overgangssone som KO1S-18 A og B.	OM og CL for $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.
KO1S-20	Logg 3	S: 31 08.646 Ø: 026 36.966	Denne bergarten er en blanding av rød slambergart og grå slambergart. De grå partiene inneholder kalsitt. Prøven er innhentet fra samme overgangssone som prøvene KO1S-18 A og B og KO1S-19.	
KO1S-23	Logg 3	S: 31 08.647 Ø: 026 36.962	Dette er en kremgul sandstein som inneholder sirkulære klaster med kalsitt. Bergartsenehten denne prøven er hentet fra er meget forvitret.	
KO1S-24	Logg 3	S: 31 08.367 Ø: 026 36.976	Dette er en kremgul og finkornet sandstein som inneholder avlange leireklaster på ca. 3 cm lengde.	OM og CL for $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser.
KO1S-25 A og B	Logg 3	S: 31 08.630 Ø: 026 36.955	Dette er en kremgul og massiv sandstein. Bergarten inneholder klaster som er lysegråe og irregulære. Matriksen inneholder grønnaktige korn. Bergarten har spredte soner med noe svart materiale, som ser ut som mineralutfellinger.	
KO1S-27	Sidebergart til Witkop I	S: 31 08.602 Ø: 026 36.939	Dette er en kremgul, massiv og finkornet sandstein som inneholder soner av noe svart og violett materiale, som kan være mineralutfellinger.	
KO1S-28	Witkop I	S: 31 08.586 Ø: 026 36.925	Dette er en kremgul, finkornet og porøs sandstein som også er massiv. Prøven har en glinsende og reflekterende overflate når solen skinner på den. Bergarten inneholder svarte soner som kan være mineralutfellinger.	
KO1S-29	Witkop I	S: 31 08.574 Ø: 026 36.939	Dette er en kremgul og massiv sandstein med hvite korn i matriksen. Prøven inneholder soner med noe brunt materiale som kan være mineralutfellinger. Denne bergarten har en glinsende og reflekterende overflate når solen skinner på den.	
KO1S-34	Sidebergart til Witkop I	S: 31 08.587 Ø: 026 36.959	Dette er en kremgul og finkornet sandstein med sone av noe svart materiale i stjerneform, som kan være mineralutfellinger. I tillegg inneholder prøven sirkulære og avlange soner med noe mørkebrunt materiale, som også kan være mineralutfellinger.	
KO1S-35	Sidebergart til Witkop I	S: 31 08.579 Ø: 026 36.957	Dette er en kremgul, finkornet og massiv sandstein med soner av svart materiale, som kan være mineralutfellinger. I tillegg inneholder prøven sirkulære og avlange soner med noe brunt materiale.	

Prøvenummer:	Lokalitet:	GPS-koordinater:	Beskrivelse i håndstykket:	Analyser
KO1S-44	Witkop I	S: 31 08.578 Ø: 026 36.926	Dette er en lys kremgul og hvit sandstein. Den inneholder kantete klaster med noe hvitt og brunt materiale. I tillegg finnes det svarte soner i prøven, som kan være mineralutfellinger.	
KO1S-47	Witkop I	S: 31 08.590 Ø: 026 36.936	Dette er en kremgul og hvit sandstein. Dens overflate er glinsende og reflekterende når solen skinner på den. Prøven inneholder soner med noe brunt materiale, som kan være mineralutfellinger. Bergarten inneholder kantete klaster med noe hvitt og brunt materiale.	
KO1S-49	Witkop I	S: 31 08.579 Ø: 026 36.932	Dette er en liten topp av en forvitringsoverflate som inneholder kremgul sandstein.	
KO3HS-28A	Witkop I	S: -31 08.3412122 Ø: 026 36. 5483244	Prøven er av samme materiale som prøven KO1S-40, fra den kalsittementerte sedimentære pipestrukturen. Bergarten er finkornet og porøs, med en lysere og gråere farge enn resten av bergartene i Witkop I. Den inneholder svarte og gråe soner. Den inneholder også kalsitt.	

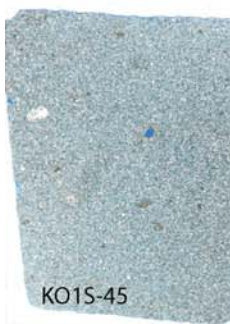
10.31 Leirmineralinnhold

Prøve	Høyde illitt 002	Høyde kloritt 003	Høyde kaolinitt 001	Illitt/kloritt	Illitt/kaolinitt
KO1S-1	1059,47	2742,36		0,3863351	
KO1S-8	1459,23	3657,92		0,3989234	
KO1S-22	683,63	1537,61		0,4446056	
KO1S-32	816,02	2034,69		0,4010537	
KO1S-35	431,33	1388,36		0,3106759	
KO1S-7	3040,9		314,21		9,677922409
KO1S-21	1039,62	1879,43		0,5531571	
KO1S-36	1375,65	771,92		1,7821147	
KO1S-37	1140,38		103,56		11,01178061
KO1S-6	618,76	3035,44		0,2038452	
KO1S-12	442,98	1065,97		0,4155652	
KO1S-26	823,07	1496,8		0,5498864	
KO1S-3	946,51	5041,67		0,1877374	
KO1S-9	558,2	2050,85		0,2721798	
KO1S-34	570,8	1182,88		0,4825511	
KO1S-30	154,01	?		?	
KO1S-31	259,9	563		0,4616341	
KO1S-40	52,18	331,57		0,1573725	
KO1S-41	454,76	987		0,4607497	
KO1S-42	549,72	2825,81		0,1945354	
KO1S-45	80,66	284,37		0,2836445	
KO1S-46	60,79	363,69		0,1671478	
KO1S-48	114,41	681,35		0,1679166	
KO1S-50	330,8	337,45		0,9802934	
KO1S-51	502,49	570,9		0,8801717	
KO3HS-25	1178,66	4185		0,2816392	
KO3HS-26	95,62	404,7		0,2362738	
KO3HS-27	1086,61	803,43		1,3524638	
KO3HS-28B	345,35	1352,74		0,2552967	

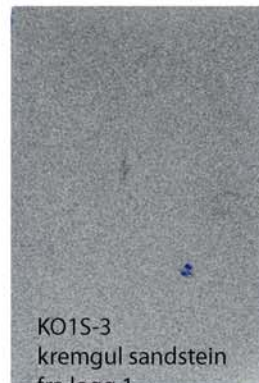
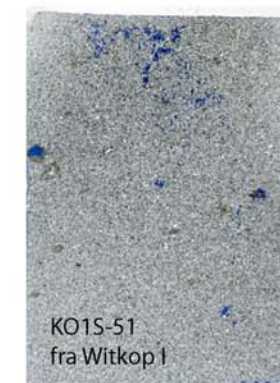
10.32 Tynnslipsbilder

Tynnslipsbilder der bredden på kortsiden av bildet tilsvarer ca. 2 cm.

Prøver fra ventkomplekset Witkop I:



Hastighetsprøver:



Prøve av rød slambergart



Kremgule sandsteiner fra nærområdet til Witkop I

