

Variasjon i kjemisk sammensetning av wöhleritt: en mulig petrologisk indikator på pegmatittsmelten

Øyvind Sunde^{1*}, Henrik Friis¹, Tom Andersen²

¹Naturhistorisk museum, Postboks 1172, Blindern, 0318 Oslo (*oyvind.geologi@gmail.com)

²Institutt for Geofag, Boks 1047, Blindern, 0316 Oslo.

Introduksjon

Wöhleritt med ideell formel $\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Zr,Nb})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{O,F})_2$ er et Na-Zr-disilikat som danner en egen mineralgruppe og er beslektet med mosandritt- og rosenbuschitt-gruppen av mineraler. På verdensbasis er wöhleritt beskrevet som en aksessorisk fase i alkaline komplekser (Chiao & Gault 1979; Mariano & Roeder 1989; Keller & Williams 1995; Biagioni *et. al.* 2012), men i Larvik plutonkompleks (LPC) i Oslofeltet opptrer wöhleritt rikelig i mange pegmatitter som et primærmagmatisk mineral. I disse pegmatittene krystalliserte wöhleritt tidlig sammen med mikroklin, nefelin, magnetitt, annitt, og amfibol (Larsen 2010). Strukturelt har wöhleritt en kompleks krystallkjemi med fire rader brede oktaederposisjoner som deler kanter og knyttes sammen av Si_2O_7 tetraedere (Mellini & Merlino 1978; Merlino & Perchiazzi 1988; Biagioni *et. al.* 2012). Kontraster i den kjemiske sammensetningen av frisk wöhleritt fra ulike pegmatitter i LPC kan gi informasjon om den opprinnelige pegmatittsmelten og hvorvidt pegmatittene representerer bergarten de sitter i.

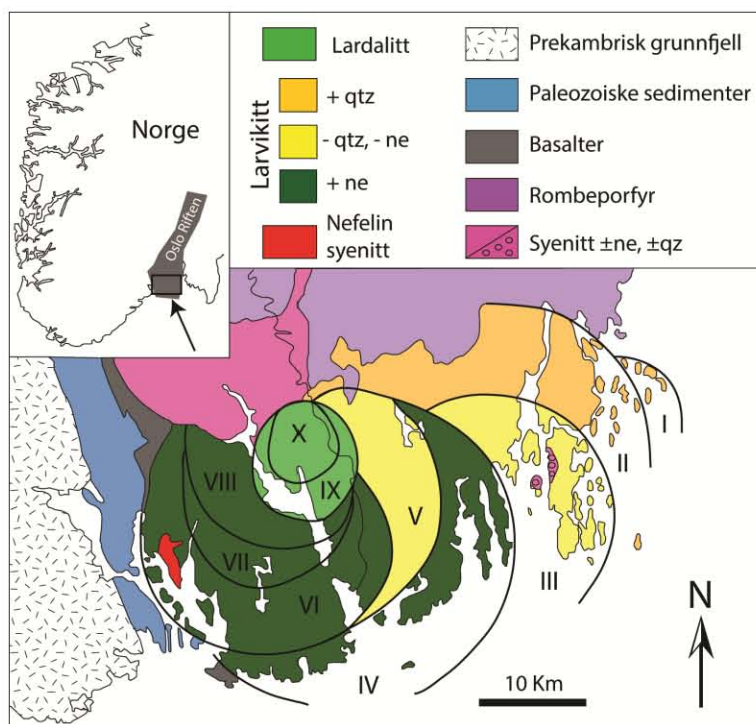


Fig. 1. Forenklet geologisk kart over larvikitt komplekset. Modifisert etter Petersen (1978) og Dahlgren (2010).

Geologisk bakgrunn

Oslofeltet referer til den kontinentale riftdannelsen for 300 millioner år siden i overgangen karbon – perm, og er relatert til skjærbevegelser i Sorgenfrei-Tornquist-beltet (Neumann *et. al.* 2004). Tektonikken i Oslofeltet strekker seg fra Skagerak i sør til Rena i nord som en grabenstruktur, og feltet er verdenskjent for sine velbevarte permiske intrusiver og eruptiv bergarter mellom Vestfold og Akershus. De intrusive bergartene varierer mellom syenittiske til granittiske sammensetninger (Neumann 1976; Sundvoll *et. al.* 1990; Larsen *et. al.* 2008), men larvikittene utgjør det største og mest differensierte monsonittiske bergartskomplekset i Oslofeltet med en karakteristisk ringstruktur (Fig. 1). Larvikitt er kjemisk sett en monsonitt med ternær feltspat som har en karakteristisk blå schiller (Le Maitre *et. al.* 2002). Ringstrukturene er tolket å representere individuelle plutoner med en kontinuerlig utvikling fra kvartsførende monsonitter i øst (Ring I og II), monsonitt uten kvarts eller nefelin (Ring III og V), til nefelinførende monsonitter i vest (Ring VI, VII, og VIII) (Petersen 1978; Neumann 1980). Ringsegment IX og X består av en annen type nefelinsyenitt (lardalitt) som karakteriseres av en grovkornet sub- til euhedral nefelin, og rombisk feltspat (Le Maitre *et. al.* 2002; Dahlgren 2010).

Pegmatittene i LPC

Pegmatittene opptrer med en kompleks morfologi og mineralsonering med romlig utstrekning som varierer i størrelse; fra de helt små (cm skala) til store ganger med utstrekning på flere titalls meter. Kompleksiteten i pegmatittene er for stor til at det mulig å gi en fullstendig oversikt her, men en generell oversikt er gitt av Dahlgren (Larsen 2010). Med unntak av noen få tilfeller opptrer pegmatittene internt i larvikittkomplekset og innenfor de ulike ringstrukturene (Fig.1). Mineralsoneringen i mange av pegmatittene er kompleks hvor mineralparagenesen endrer seg hurtig horisontalt og vertikalt over korte avstander. Sammenlignet med granittiske pegmatitter med en mer åpenbar mineralsonering som funksjon av krystallisasjonsrekkefølge, er de alkaline pegmatittene i LPC typisk sonerte som følge av gravitasjon, hydros omvandling, sekundære faser, og teksturelle forskjeller. Brøgger (1890) oppdaget en viktig forskjell i mineralogien mellom pegmatitter sør for Stavern og på øyene i Langesundsfjorden, hvor grunnstoffer med høy valens (eks., Zr^{4+} , Nb^{5+} , Ti^{4+}) danner ulike mineraler. Det er vél kjent at en gruppe pegmatitter karakteriseres av mineralsammensetningen pyroklor, zirkonolitt, og zirkon (Stavern-typen), mens pegmatitter i Langesundsfjorden karakteriseres av komplekse Na-Zr-disilikater (eks., eudialytt-gruppen, låvenitt m.fl.) (Andersen 2010; Larsen 2010; Piilonen 2012, 2013). Noen av pegmatittene med kompleks mineralogi opptrer i en tydelig relasjon til nefelinsyenitt, både som sidebergart, men også blandet inn i selve pegmatittkroppen, og et uavklart spørsmål er hvorvidt noen pegmatitter er derivert fra nefelinsyenitt fremfor larvikitt.

Prøvemateriale

Oversikt over prøvelokaliteter i forhold til ringseksjon er vist i Fig. 2. Totalt er wöhleritt fra 43 lokaliteter analysert og for enkelte lokaliteter er flere analyser av ulike korn konsolidert til et gjennomsnittlig representativt datapunkt. Prøvene representerer pegmatitter mellom ringseksjon III – VII, men den største frekvensen av prøver er relatert til ringseksjon VI.

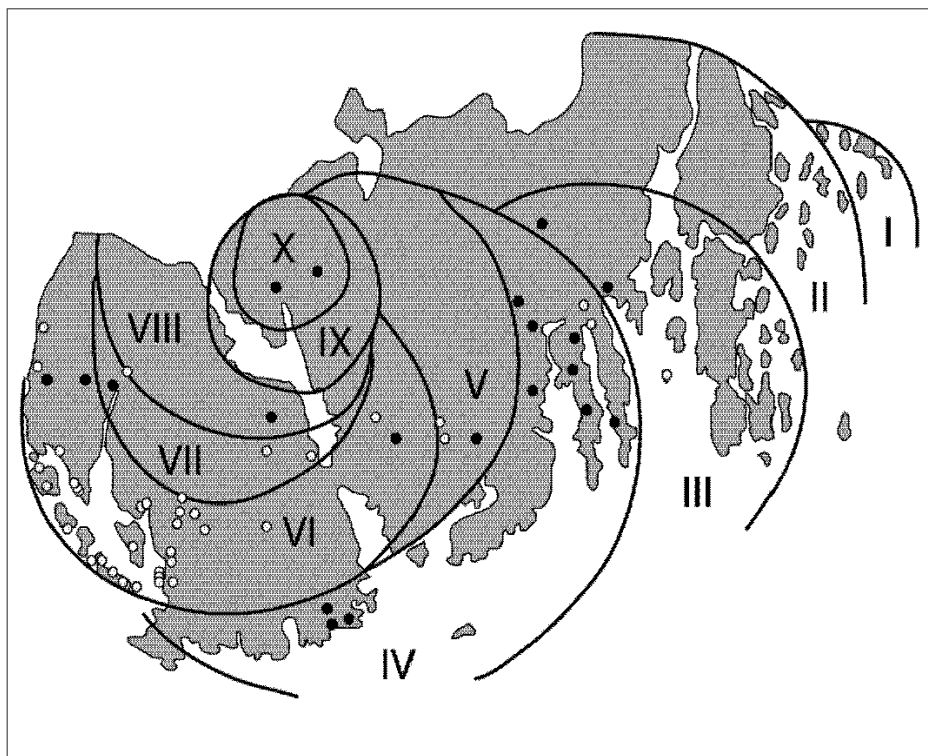


Fig. 2. Oversikt over lokaliteter. Hvite sirkler = pegmatitter som er prøvetatt, sorte sirkler = andre lokaliteter.

Analytiske metoder

Hovedelementer

Hovedkjemi ble analysert på en Cameca SX100 elektronmikrosonde utstyrt med fem spektrometre (WDS) ved Institutt for Geofag, Universitetet i Oslo. Mineralprøvene ble støpt inn i epoksy og dekket med et tynt karbonlag. Følgende naturlige og syntetiske standarder ble benyttet i kalibreringen: wollastonitt (Ca $K\alpha$, Si $K\alpha$), albitt (Na $K\alpha$), pyrofanitt (Mn $K\alpha$, Ti $K\alpha$), zirkon (Zr $L\alpha$), fluoritt (F $K\alpha$), rene metaller (Fe $K\alpha$, Nb $L\alpha$, Hf $M\alpha$), og syntetiske ortofosfater for REE og Y (Y $L\alpha$, La $L\alpha$, Ce $L\alpha$, Nd $L\beta$, Pr $L\beta$) (Jarosewich & Boatner 1991; Donovan *et. al.* 2003). Topp- og bakgrunnsforhold ble akseptert dersom gjennomsnittet av 7 målinger var innenfor 3σ . Intensitet ble korrigert for interne grunnstoffoverlapp og grunnmasse effekter ved bruk av PAP prosedyren (Pouchou & Pichoir 1984). Alle formelberegninger (apfu) er gjort med hensyn til 18 anioner.

Sporelementer

Sporelementer ble analysert på en Bruker Aurora Elite Quadrupole ICP-MS med en montert CTAC LXS213G2+ lasersonde ved Institutt for Geofag, Universitetet i Oslo. Totalt ble 31 elementer inkludert i oppsettet, men analyser som falt under deteksjonsgrensen er ikke inkludert i dataene. Følgende parametre ble benyttet for samtlige analyser: puls 10 Hz, hviletid 10 ms, åpningstid 12 s, byggetelling 275, og 40 μm punktstørrelse med 40 % laserenergi. For å kontrollere stabilitet og drift i instrumentet ble kjente prøver (NIST 610 og BCR-2G) analysert mellom serier på ti ukjente prøver.

Kvantitative resultater ble registrert ved å normalisere hver analyse til Si-verdier (vektprosent) hentet fra elektronmikrosonde.

Resultater

Hovedelementer

Et utdrag av representative hovedelementer er presentert i tabell 1 som gjennomsnitt av flere analysepunkter. Na varierer i snitt mellom 1,6 og 2,0 apfu, Ca 3,7 – 3,9 apfu, Si 3,9 – 4,0 apfu, Zr 0,91 – 0,95 apfu, og Nb 0,6 – 0,8 apfu. Alle prøvene er svært lave i Mg med en større spredning mellom Fe og Mn. Ca og Na er relativt konstant i innbyrdes forhold, og tilsvarende for Nb og Zr (Fig. 3). Ti er relativt konstant omkring 0,1 apfu mens Fe, Mn, Mg varierer i sum mellom 0,2 – 0,4 apfu (Fig. 4).

Tabell 1. Representative analyser av hovedelementer i wöhleritt fra LPC. STAUP = Stauper, KAM = Kamffjord pukkværk, HAF = Hafallen, STAL = Stålaker, SAG3 = Sagåsen, TVE5 = Bjørndalen, LAV = Låven, BVK3 = Barkevika (Biong), RONN = Rønningen (Telemarksporten), HED = Hedrum, BJON2 = Bjønneshalvøya nord, BJON3 = Bjønneshalvøya sør, STOK2 = Stokkøya (Båtbukta), ONNA = Ønna, PAUL = Pauler (E18), SKY = Sky (E18). * = LA-ICPMS.

<i>n</i>	13	10	15	15	10	19	17	21
<i>Lok.</i>	STAUP	KAM	HAF	STAL	SAG3	TVE5	LAV	BVK3
Pluton	3	4	4	5	6	6	6	6
F	4.4(7)	5.2(9)	5.2(6)	3.8(4)	4.1(6)	4.2(4)	4(1)	4.5(6)
Na ₂ O	7.1(2)	7.2(2)	7.1(2)	6.5(1)	7.1(2)	7.1(1)	7.8(3)	7.3(4)
FeO	1.6(1)	1.9(2)	1.4(2)	0.8(1)	1.5(1)	1.5(2)	1.5(8)	1.4(4)
MgO	0.29(3)	0.28(1)*	0.26(7)	0.24(1)*	0.27(1)*	0.187(9)*	0.20(8)	0.18(1)*
MnO	0.9(1)	0.9(1)	1.04(7)	1.8(1)	1.09(7)	1.7(4)	1.2(6)	0.9(2)
CaO	26.6(4)	27.2(5)	28.0(8)	27.8(3)	26.9(3)	26.8(5)	25(1)	26.7(5)
Y ₂ O ₃	0.42(6)	0.52(7)	0.3(1)	0.46(7)	0.43(8)	0.3(1)	0.41(7)	0.41(7)
ΣREE ₂ O ₃ *	0.636	0.639	0.586	0.628	0.677	0.573	0.641	0.689
HfO ₂	0.39(6)	0.39(4)	0.40(7)	0.65(8)	0.43(5)	0.43(6)	0.43(8)	0.40(6)
SiO ₂	29.4(5)	29.8(3)	29.8(4)	29.4(4)	29.5(1)	29.5(3)	29.7(4)	29.8(3)
TiO ₂	1.03(8)	0.84(9)	0.96(8)	0.81(4)	0.78(5)	0.7(1)	1.0(1)	1.2(1)
ZrO ₂	14.1(4)	14.4(4)	14.3(3)	13.9(3)	14.1(3)	14.3(4)	14.5(2)	14.8(4)
Nb ₂ O ₅	12.7(6)	12.2(6)	11(1)	13.3(3)	13.4(5)	13(1)	12(2)	13.1(6)
-F=O	-1.88	-2.21	-2.21	-1.63	-1.74	-1.8	-2.1	-1.92
Total	97.68	98.97	98.13	98.21	98.26	98.3	96.28	99.27
F	1.89	2.18	2.17	1.64	1.74	1.80	2.08	1.89
Na	1.85	1.85	1.81	1.68	1.85	1.84	2.00	1.87
Mg	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03
Si	3.91	3.90	3.91	3.92	3.92	3.93	3.92	3.90
Ca	3.81	3.82	3.93	3.97	3.83	3.81	3.66	3.75
Fe	0.18	0.21	0.16	0.09	0.17	0.17	0.17	0.16
Zr	0.92	0.92	0.91	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95
Nb	0.77	0.73	0.69	0.80	0.81	0.78	0.74	0.78
Mn	0.11	0.11	0.12	0.21	0.12	0.19	0.14	0.10
Ti	0.10	0.08	0.10	0.09	0.08	0.07	0.11	0.13
Y	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
ΣREE	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
O	2.06	1.77	1.76	2.26	2.22	2.15	1.86	2.06

Tabell 1(forts.)

<i>n</i>	5	15	6	6	7	12	9	12
<i>Lok.</i>	<i>RONN</i>	<i>HED</i>	<i>BJON2</i>	<i>BJON3</i>	<i>STOK2</i>	<i>ONNA</i>	<i>PAUL</i>	<i>SKY</i>
Pluton	6	6	6	6	6	7	7	7
F	4.0(5)	4.9(5)	4.0(3)	4.2(6)	4.5(7)	5.8(6)	4.5(5)	4.1(5)
Na ₂ O	6.9(1)	6.2(3)	7.2(1)	7.6(2)	6.93(6)	6.9(2)	6.6(2)	7.1(1)
FeO	1.43(9)	1.3(2)	1.89(9)	1.1(2)	1.2(2)	1.2(3)	1.2(1)	1.5(1)
MgO*	0.186(5)	0.38(5)	0.182(6)	0.166(7)	0.212(5)	0.29(1)	0.27(1)	0.31(1)
MnO	1.4(4)	1.5(4)	0.90(8)	0.81(8)	0.97(9)	2.3(6)	1.6(1)	1.30(9)
CaO	27.1(1)	29.2(7)	26.7(2)	26.3(2)	28.4(3)	26.8(3)	28.0(5)	27.4(5)
Y ₂ O ₃	0.40(2)	0.50(7)	0.39(8)	0.36(3)	0.3(1)	0.5(1)	0.58(4)	0.3(1)
ΣREE ₂ O ₃ *	0.542	0.581	0.627	0.752	0.557	0.643	0.688	0.68
HfO ₂	0.43(7)	0.46(6)	0.41(5)	0.35(3)	0.40(4)	0.48(7)	0.84(6)	0.44(6)
SiO ₂	29.9(2)	30.0(3)	29.3(2)	29.3(3)	29.5(1)	29.2(5)	29.7(2)	29.8(2)
TiO ₂	0.7(1)	1.14(9)	0.99(3)	1.5(1)	1.38(5)	0.58(5)	0.77(5)	0.81(5)
ZrO ₂	14.9(2)	14.1(3)	14.3(2)	14.4(2)	14.3(1)	14.2(2)	14.0(3)	14.3(3)
Nb ₂ O ₅	12(1)	10.8(7)	13.1(3)	13.0(6)	11.3(4)	12.2(6)	12.4(4)	13.1(4)
-F=O	-1.72	-2.08	-1.69	-1.77	-1.91	-2.45	-1.91	-1.75
Total	97.98	98.6	98.11	97.9	97.82	98.35	98.96	99.08
F	1.71	2.05	1.70	1.77	1.90	2.43	1.90	1.73
Na	1.78	1.59	1.88	1.96	1.78	1.78	1.69	1.81
Mg	0.04	0.08	0.04	0.03	0.04	0.06	0.05	0.06
Si	3.95	3.93	3.91	3.90	3.91	3.85	3.92	3.92
Ca	3.83	4.10	3.83	3.75	4.03	3.79	3.96	3.86
Fe	0.16	0.15	0.21	0.13	0.14	0.14	0.13	0.17
Zr	0.96	0.90	0.94	0.94	0.93	0.91	0.91	0.92
Nb	0.77	0.64	0.79	0.78	0.68	0.73	0.74	0.78
Mn	0.17	0.17	0.10	0.09	0.11	0.26	0.18	0.14
Ti	0.07	0.11	0.10	0.15	0.14	0.05	0.08	0.08
Y	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04
ΣREE	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
O	2.2	1.89	2.29	2.20	2.07	1.52	2.04	2.22

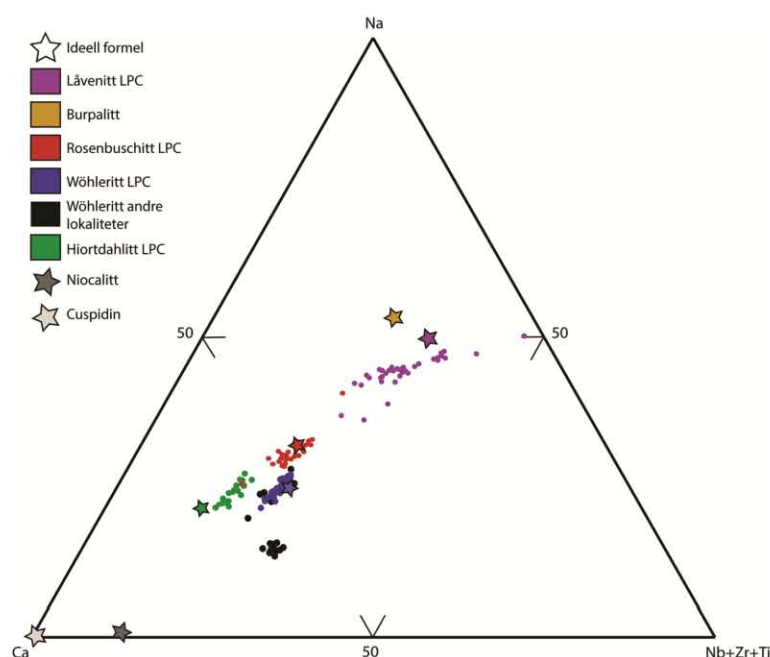


Fig. 3. Ternært plot med endeleddene Na-Ca-(Nb+Zr+Ti) i apfu for noen Na-Zr-disilikater som forekommer i LPC (wöhleritt, hiortdahlitt, rosenbuschitt, og låvenitt). Burpalitt, niocalitt, og cuspidin er lagt inn med ideell formel. Litteratordata fra Mariano & Roeder (1989), Keller & Williams (1995), Chao & Gault (1997), Andersen (2010, 2013) og Biagioni (2012).

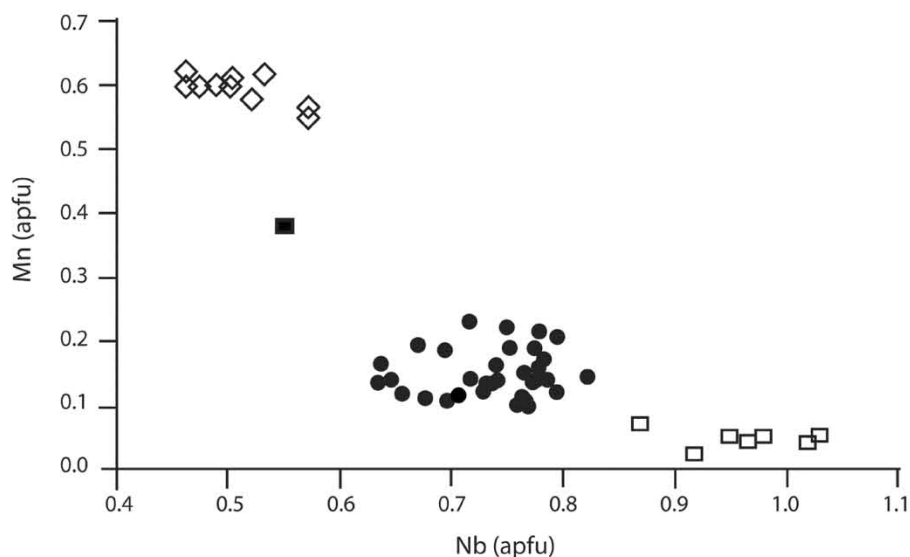


Fig. 4. Plot med Mn og Nb sammensetninger (apfu) av wöhleritt fra ulike lokaliteter: Åpen firkant = aksessorisk wöhleritt tilknyttet karbonatitter, sorte sirkler = primær wöhleritt fra LPC, sort firkant = wöhleritt fra Mt. Saint-Hilaire, diamant = wöhleritt fra nefelin syenitt i Los Archipelago. Litteratordata fra Mariano & Roeder (1989), Keller & Williams (1995), Chao & Gault (1997), Andersen (2010, 2013) og Biagioni (2012).

Sporelementer

Representative analyser av sporelementene vises i tabell 2 og er et gjennomsnitt av flere analysepunkter. Alle punkter er under 15 % av usikkerheten til 2σ . Av de analyserte sporelementer er de vesentlige kationer som er innenfor deteksjonsgrensen på massespektrometeret Mn, Fe, Ti, Hf, Y, og REE (La til og med Lu). Al er svært lavt i samtlige prøver ($< 0,01$ apfu), og Ta, W, U, og Th er ikke inkludert i formelberegningen fordi usikkerheten i analysene er for stor. REE innhold er presentert som et chondrittnormalisert plott etter McDonough & Sun (1995) (Fig. 5) hvor de enkelte profilene representerer én lokalitet. REE viser ulike relative forhold mellom LREE (La - Nd), MREE (Sm - Gd), og HREE (Tb - Lu). HREE er i alle prøvene anriket relativt til LREE i størrelsesorden $\times 10$, og figur 6 viser forholdet Yb/La plottet mot Gd/Yb (apfu).

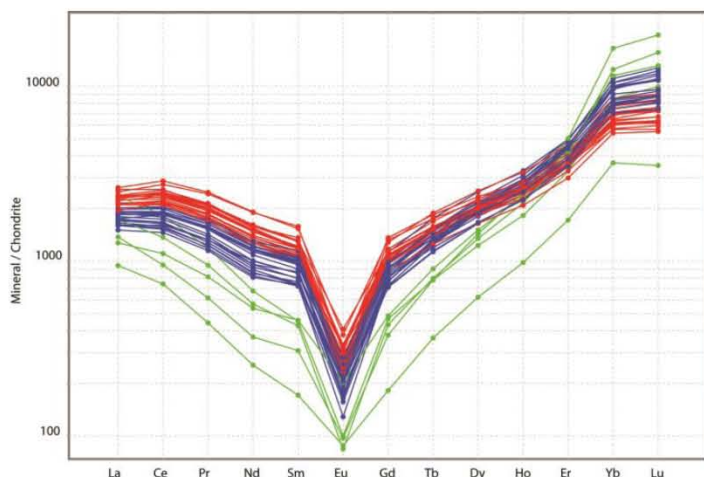


Fig. 5. Chondrittnormalisert plot over fordelingen av sporelementer i wöhleritt fra LPC. Normaliseringen er gjort etter McDonough & Sun (1995). Grønn, blå, og rød indikerer tre ulike grupperinger mellom wöhleritt (ref. teksten under diskusjon).

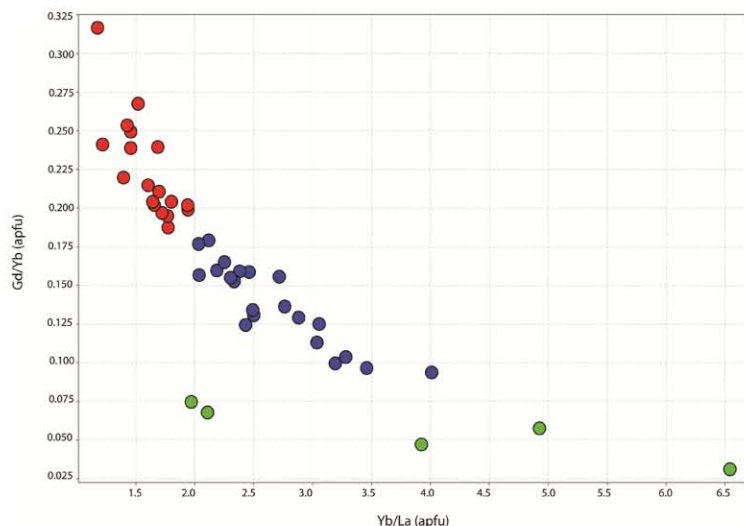


Fig. 6. Plot av LREE-MREE-HREE-sammensetning av wöhleritt fra LPC.

Tabell 2. Representative analyser av sporelementer. Lokalteter som i Tabell 1.

<i>n</i>	4	9	3	20	10	14
Lok.	STAUP	KAM	HAF	STAL	SAG3	TVE5
Pluton	3	4	4	5	6	6
Mg	1708(153)	1708(130)	1620(165)	1491(106)	1631(146)	1128(91)
Al	189(243)	218(293)	132(6)	226(246)	150(119)	157(78)
P	61(13)	47(19)	60(13)	34(17)	39(6)	43(17)
Ti	6140(184)	5098(364)	6158(311)	5274(301)	4546(270)	4087(473)
Sr	28(30)	23(2)	49(1)	17(65)	63(33)	69(26)
Y	4150(272)	4718(314)	4252(360)	4748(163)	5006(374)	3920(371)
La	513(65)	393(33)	447(37)	411(26)	452(24)	390(43)
Ce	1321(74)	965(84)	1093(83)	838(49)	1154(71)	995(78)
Pr	162(8)	118(9)	132(12)	87(4)	146(9)	116(6)
Nd	583(22)	405(32)	459(39)	259(12)	536(34)	406(18)
Sm	156(4)	113(8)	126(10)	63(3)	149(10)	109(4)
Eu	11.5(4)	8.8(7)	11(1)	4.7(3)	13(2)	10.3(4)
Gd	194(6)	153(10)	161(15)	86(5)	192(12)	142(7)
Tb	51(1)	44(2)	45(4)	28(2)	54(3)	41(2)
Dy	478(13)	453(28)	443(43)	331(28)	536(32)	409(30)
Ho	135(6)	144(9)	130(12)	117(10)	160(10)	126(10)
Er	587(29)	697(47)	578(56)	659(55)	739(43)	592(52)
Tm	121(8)	164(12)	128(11)	182(17)	168(9)	137(12)
Yb	1059(83)	1600(132)	1134(90)	2009(202)	1557(72)	1293(136)
Lu	179(17)	285(26)	182(14)	384(38)	269(9)	226(27)
Hf	3402(130)	3604(122)	3858(74)	5840(424)	4016(294)	3687(383)
Ta	2500(106)	1932(56)	3597(357)	857(103)	1790(340)	2221(216)
W	136(5)	186(40)	216(16)	402(89)	244(32)	228(26)
Pb	164(551)	8(3)	20.2(5)	26(3)	7.9(3)	27(47)
Th	22(14)	25(3)	20(4)	11(1)	27(6)	26(3)
U	14(19)	7(1)	52(21)	0.47(22)	6(5)	12(2)

Tabell 2 (forts.)

<i>n</i>	9	15	6	14	8	8
<i>Lok.</i>	<i>LAV</i>	<i>BVK3</i>	<i>RONN</i>	<i>HED</i>	<i>BJON2</i>	<i>BJON3</i>
Pluton	6	6	6	6	6	6
Mg	1238(235)	1094(177)	1122(57)	2323(561)	1102(69)	999(78)
Al	193(205)	108(30)	123(28)	169(32)	85(25)	78(33)
P	45(31)	44(12)	44(18)	48(21)	40(9)	45(11)
Ti	6354(457)	7237(730)	4393(693)	6292(805)	5343(466)	9222(266)
Sr	85(35)	104(9)	77(14)	26(5)	99(4)	105(8)
Y	3841(131)	3895(387)	3771(214)	4542(493)	3823(125)	3991(183)
La	505(77)	556(21)	385(17)	301(28)	458(11)	623(26)
Ce	1355(224)	1506(73)	943(49)	677(63)	1313(40)	1762(101)
Pr	170(25)	192(9)	114(7)	75(6)	170(4)	229(12)
Nd	626(84)	719(41)	388(24)	245(21)	635(15)	872(54)
Sm	163(17)	188(12)	107(7)	68(5)	173(4)	227(15)
Eu	14(1)	22(1)	11.6(9)	11(1)	13.7(5)	21(1)
Gd	197(15)	221(17)	140(7)	96(8)	208(8)	262(16)
Tb	51(3)	55(4)	40(2)	32(3)	53(2)	63(4)
Dy	463(23)	495(46)	397(27)	370(35)	480(25)	541(31)
Ho	130(5)	136(14)	122(6)	128(12)	132(7)	144(8)
Er	563(23)	577(68)	561(35)	690(67)	554(37)	574(29)
Tm	118(5)	119(16)	126(8)	182(17)	113(7)	112(5)
Yb	1015(55)	999(161)	1165(74)	1850(185)	959(70)	913(50)
Lu	164(8)	157(25)	194(15)	322(35)	152(10)	139(7)
Hf	3927(193)	3851(237)	4110(157)	4160(396)	3405(219)	3274(108)
Ta	2398(184)	2484(254)	2542(237)	1879(490)	1764(140)	2953(151)
W	261(46)	344(137)	261(58)	716(102)	214(39)	298(80)
Pb	11(4)	9(1)	15(5)	15(6)	7.7(5)	10.9(7)
Th	26(12)	26(8)	20(1)	40(5)	21(1)	27(3)
U	18(8)	6(2)	15(8)	26(23)	11(2)	42(3)

Diskusjon

Hoved- og sporelementer

Sammensetningen av hovedelementene i wöhleritt fra LPC sammenlignet med andre lokaliteter (eks., i andre nefelinsyenitter og karbonatitter; Fig. 3 og 4) plotter tett på den ideelle sammensetningen $\text{Na}_2\text{Ca}_4(\text{Zr},\text{Nb})(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{F},\text{O}_3)$. Hovedelementene varierer i svært liten grad fra ringseksjon III til VII, og viser ingen systematisk utvikling mellom ringseksjonene. Fleksibilitet i sammensetningen av wöhleritt er strukturelt begrenset med hensyn til bevaring av ladning og kationplasser. For store endringer i Na, Ca, Zr, og Nb forholdet vil implisitt føre til en annen stabil konfigurasjon av koordinasjonspolyedere, og dermed danne et nytt mineral (eksempelvis mellom wöhleritt, låvenitt, rosenbuschitt gruppene). Mn rik wöhleritt er beskrevet fra Los Archipelago (Biagioni 2012) ved en teoretisk koblet substitusjon av $\text{Nb}^{5+} + 2\text{Na}^+ + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+} + \text{F}^-$, men ingen av prøvene fra LPC har noe høyt innhold av Fe, Mn, og Mg. Derimot indikerer sporelementene en større og gjennomgående variasjon som fremgår i kurvaturen på de chondrittnormaliserte REE profilene (Fig. 4, og 6). Ulik forhold mellom LREE, MREE, og HREE gir en ulik helning på kurvene og viser i hovedsak 3 ulike grupperinger (Fig. 5, 6).

Figur 7 viser wöhlerittgrupperingen i kartbildet basert på sammensetningen av sporelementene. En interessant observasjon er hvordan sammensetningen av sporelementer til wöhleritt fra ringseksjon III

(Stauper) og IV (Hafallen og Kamfjord) er svært like, mens deler av ringseksjon V (Håkestad, Stålaker), VI (Hedrum), og VII (Pauler) har et helt annet karakteristisk profil. Prøver som er samlet fra pegmatitter som opptrer i nefelinsyenitt (som hovedlithologi, f.eks., Bjønnes-halvøya), delvis i tilknytning til nefelinsyenitt (begrenset til en kontaktsone), eller uten relasjon til nefelinsyenitt viser ingen innbyrdes forskjeller.

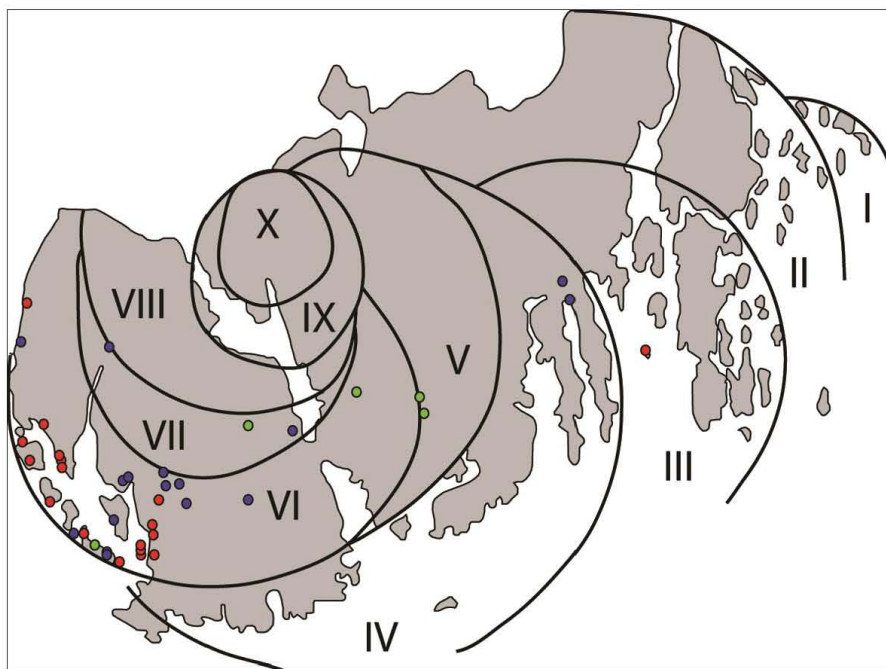


Fig. 7. Forenklet oversikt over LPC med lokalitetene som er analysert, og inndelt etter grupperinger basert på sporelement sammensetningen (grønn, blå, rød).

Nåværende forståelse av LPC

Den tradisjonelle tolkningen av LPC er en kontinuerlig utvikling av larvikittmagmaet representert av en serie individuelle plutoner (Fig.1). Petrologiske beskrivelser av larvikittmassivet er i det store bildet mangelfullt (Neumann 1980), og tolkningen av ringstrukturene er i stor grad basert på fremtredende lineamenter i terrenget (Petersen 1978). Senere undersøkelser av Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) har gjort en nyere tolkning av larvikittene ved å kombinere feltkartlegging og geofysiske målinger (magnetiske og radiometriske data), og kartlagt en større intern variasjon i larvikittene og ringstrukturene (Heldal *et. al.* 1999).

Konklusjon

Wöhleritt er et utbredt mineral i mange pegmatitter innenfor LPC og har en varierende sammensetning med hensyn på sporelementer. Som et tidlig utkrystallisert primærmineral er wöhleritt godt egnet til å undersøke kilden som pegmatittene er dannet fra. Pegmatittene som er prøvetatt gjenspeiler sannsynligvis ringseksjonen de opptrer i, men disse passer ikke helt med vår nåværende petrologiske og strukturelle forståelse av de faktiske variasjoner internt i larvikittkomplekset.

Takk

Stor takk til Alf Olav Larsen for guiding og båtfrakt omkring øyene i Langesundsfjorden, Svein Arne Berge for sprøytekanner og uvurderlige prøver, Peter Andresen for tilsendte prøver og guiding, Knut Edvard Larsen for guiding til Hafallen og Skallist, Torfinn Kjærnet for guiding i Sagåsen, og Ingulv Burvald for god innføring i Tuften. Takk til Muriel Erambert og Siri Simonsen for hjelp til analyser på mikrosonden og massespektrometeret.

Referanser

- Andersen, T., Erambert, M., Larsen, A.O. & Selbekk, R.S. (2010): Petrology of nepheline syenite pegmatites in the Oslo Rift, Norway: Zirconium silicate mineral assemblages as indicators of alkalinity and volatile fugacity in mildly agpaitic magma. *Journal of Petrology* **11**, 2303-2325.
- Andersen, T., Erambert, M., Larsen, A.O. & Selbekk, R.S. (2012): Petrology of nepheline syenite pegmatites in the Oslo Rift, Norway: Zr and Ti mineral assemblages in miaskitic and agpaitic pegmatites in the Larvik Plutonic Complex. *Mineralogia* **44**, 61-98.
- Biagioni, C., Merlino, S., Parodi, G.C., & Perchiazzi, N. (2012): Crystal chemistry of minerals of the wöhlerite group from the Los Archipelago, Guinea. *The Canadian Mineralogist* **50**, 593-609.
- Brøgger, W.C. (1890): Die Mineralien der Syenitpegmatitgänge der südnorwegischen Augit- und Nephelinsyenite. *Zeitschrift für Krystallographie* **16**, 1-235.
- Chao, Y.G. & Gault, A.R. (1997): Normandite, The Ti-analogue of lāvenite from Mont Saint-Hilaire, Quebec. *The Canadian Mineralogist* **35**, 1035-1039.
- Dahlgren, S. (2010): The Larvik Plutonic Complex: The larvikite and nepheline syenite plutons and their pegmatites. I A.O. Larsen (ed). *The Langesundsfjord. History, Geology, Pegmatites, Minerals* (pp. 26-37). Bode Verlag GmbH, Salzhemmendorf, Germany.
- Donovan, J.J., Hanchar, M.J., Picolli, M.P., Schrier, D.M., Boatner, A.L., & Jarosewich, E. (2003): A re-examination of the rare-earth-element orthophosphate standards in use for electron-microprobe analysis. *The Canadian Mineralogist* **41**, 221-232.
- Heldal, T., Kjølle, I., Beard, P.L., Tegner, C. & Lynum, R. (1998): Kartlegging av larvikitt mellom Sandefjord og Porsgrunn. *Norges Geologiske Undersøkelse, Rapport 99.059*, ISSN 0800-3416.
- Jarosewich, E., & Boatner, L.A. (1991): Rare-earth element reference samples for electron microprobe analysis. *Geostandards Newsletter* **15**, 397 – 399.
- Keller, J. & Williams, C.T. (1995): Niocalite and wöhlerite from the alkaline and carbonatite rocks at Kaiserstuhl, Germany. *Mineralogical Magazine* **59**, 561-566.
- Larsen, A.O. (2010): *The Langesundsfjord. History, Geology, Pegmatites, Minerals*. Bode Verlag GmbH, Salzhemmendorf, Germany.

- Larsen, B.T., Olaussen, S., Sundvoll, B., & Heeremans, M. (2008): The Permo-Carboniferous Oslo Rift through six stages and 65 million years. *Episodes* **31**, 52-58.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H., & Wooley, A.R. (2002): *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.
- McDonough, W.F. & Sun, S.S. (1995): The composition of the Earth. *Chemical Geology* **120**, 223-253.
- Mariano A. & Roeder, P. (1989): Wöhlerite: chemical composition, cathodoluminescence and environment of crystallization. *The Canadian Mineralogist* **27**, 709-720.
- Mellini, M., & Merlino, S. (1979). Refinement of the crystal structure of wöhlerite. *Tschermaks Min.Petr.Mitt.* **26**, 109-123.
- Merlino, S., & Perchiazzi, N. (1988): Modular mineralogy in the cuspidine group of minerals. *The Canadian Mineralogist* **26**, 933-943.
- Neumann, E.R. (1976): Compositional relations among pyroxenes, amphiboles and other mafic phases in the Oslo Region plutonic rocks. *Lithos* **2**, 85-109.
- Neumann, E.R. (1980): Petrogenesis of the Oslo Region larvikites and associated rocks. *Journal of Petrology* **21**, 499 – 531.
- Neumann, E.R., Wilson, M., Heermans, M., Spencer, E.A., Obst, K., Timmerman, M.J. & Kirstein, L. (2004): Carboniferous-Permian rifting and magmatism in southern Scandinavia, the North Sea and northern Germany: a review: *Geological Society, London, special publication* **233**, 11 – 41.
- Sundvoll, B., Neumann, E.R., Larsen, B.T., & Tuen, E. (1990): Age relations among Oslo Rift magmatic rocks: implications for tectonic and magmatic modelling, *Tectonophysics* **178**, 67-87.
- Petersen, S.J. (1978): Structure of the larvikite-lardalite complex, Oslo-Region, Norway, and its evolution. *Geologische Rundschau* **67**, 330-342.
- Piilonen, P.C., McDonald, A.M., Poirier, G., Rowe, R. & Larsen, A.O. (2012): The mineralogy and crystal chemistry of alkaline pegmatites in the Larvik Plutonic Complex, Oslo rift valley, Norway. Part 1. Magmatic and secondary zircon: implications for petrogenesis from trace-element geochemistry. *Mineralogical magazine* **76**, 649-672.
- Piilonen, P., McDonald, M.A., Poirier, G., Rowe, R., & Larsen, A.O. (2013): Mafic minerals of the alkaline pegmatites in the Larvik Plutonic Complex, Oslo Rift, Southern Norway. *The Canadian Mineralogist* **51**, 735-770.