Geologisk Tidsskrift



DECEMBER 2011



Geologisk Tidsskrift udgives én gang årligt i trykt form af Dansk Geologisk Forening, DGF.

Geologisk Tidsskrift er Dansk Geologisk Forenings (DGF) dansksprogede publikation til bred faglig og populærvidenskabelig formidling til alle med en geologisk interesse. Redaktionskomiteen kan invitere til at skrive om et særligt aktuelt emne, men opfordrer alle til at indsende et manuskript der egner sig til bred faglig formidling. Forfattere med ideer til særnumre, er derfor meget velkomne til at henvende sig redaktøren. Tidsskriftet indeholder endvidere bestyrelsens årsberetning.

Se www.2dgf.dk/publikationer/geologisk_tidsskrift for adresse samt forfattervejledning.

Redaktion: Kurt H. Kjær (Statens Naturhistoriske Museum, SNM).

Redaktionskomite: DGF's bestyrelse.

Ansvaret for artiklernes videnskabelige indhold påhviler udelukkende forfatterne.

@ Dansk Geologisk Forening

Medlemskab af DGF koster i 2011 kr. 350, studerende dog kun kr. 150 (50 kr. reduktion ved tilmelding af kontingent til PBS).

DGF's sekretariat

Dansk Geologisk Forening Geologisk Museum Øster Voldgade 5-7 1350 København K Varierende åbningstider: se www.2dgf.dk

Tlf.. 3532 2354 E-post: dgfemail@gmail.com

DGF' S hjemmeside: www.2dgf.dk

Forsideillustration: Typisk billede fra indlandet i Maniitsoq området, sydlige Vestgrønland. Det afrundede grundfjeld gennemskæres af dybe dale. Den brune bjergart midt i forgrunden er Silisissanguit Tasiat kimberlit gangen. Som så ofte springer kimberlitforekomster ikke i øjne. Man skal lede efter dem. Foto: Agnete Steenfelt.

Diamantbærende kimberlit og aillikit i det sydlige Vestgrønland

Regionale variationer og sammensætningen af kimberlittisk smelte

AF TROELS F. D. NIELSEN

Nielsen, T. F. D. 2011: Diamantbærende kimberlit og aillikit i det sydlige Vestgrønland. Regionale variationer og sammensætningen af kimberlittisk smelte. Geologisk Tidsskrift 2011, pp. 12–40, ISSN 1350-0150, København.

Resume

Kimberlit er den væsentligste værtsbjergart for diamanter. Indtil begyndelsen af 1990'erne var interessen for kimberlittiske bjergarter i Grønland hovedsagelig akademisk med fokus på magmatype og noduler, der kunne give information om beskaffenheden af den dybe lithosfæriske kappe under den grønlandske kontinentalskorpe. Billedet ændredes radikalt i 1991 med en målrettet sammenstilling af basale data for kimberlittiske forekomster og en oversigt over deres geokemi. De mange kimberlittiske intrusioner i Grønlands arkæiske grundfjeld og fremgangsrig diamantefterforskning i Canada ansporede efterforskningsselskaber til en systematisk undersøgelse i Vestgrønland. Tusindvis af prøver af overfladeaflejringer blev samlet og undersøgt i 1990'erne, mange nye forekomster blev registreret, og mange viste sig at indeholde diamant. Det omfattende selskabsmateriale, og parallelt hermed indsamlet materiale og data i GEUS regi, samledes 2004 i en omfattende database, der dels gav overblik over forekomst af kimberlittiske bjergarter og diamanter i det sydlige Vestgrønland, og dels støttede efterforskningsselskabers interesse for diamantefterforskning i Grønland. Sammenstillingen af data åbnede også for nye forskningsmuligheder og en bedre forståelse af de grønlandske kimberlitforekomsters oprindelse.

Kimberlittiske bjergarter består af noduler fra den lithosfæriske kappe, megakryster og mikrokryster også mest fra den lithosfæriske kappe, fenokryster der kan have xenokrystiske kerne, men ellers lige som grundmassen er krystalliseret fra smelten i den kimberlittiske forekomst. I tidlige beskrivelser blev stort set alle bjergarter med noduler og megakryster kendt fra klassiske kimberlitforekomster (især Sydafrika) klassificeret som kimberlit (sensu lato). En mere detaljeret undersøgelse af et antal grønlandske forekomster fra 1999 argumenterer imidlertid for en omklassifikation af kimberlittiske bjergarter i Grønland til aillikitter og måske melnoitter, der – som diskuteret nedenfor- ikke har samme umiddelbare appeal for efterforskningsselskaber. GEUS iværksatte med støtte fra Råstofdirektoratet i Nuuk en større undersøgelse for at besvare dette spørgsmål med en systematisk undersøgelse og klassifikation af kimberlittiske forekomster i store dele af det sydlige Vestgrønland.

Det første trin var fastlæggelse af klassifikationskriterier. Traditionelt fokuserede efterforskningsselskaber på noduler og megakryster med sammensætninger svarende til de fra diamantforkomster kendte. Tidligere blev kimberlittiske bjergarter også klassificeret og navngivet ud fra deres last af bjergartsfragmenter fra jordens lithosfæriske kappe. Den form for klassifikation lever imidlertid ikke op til principper vedtaget af International Union of Geological Sciences, der fastslår at magmatiske bjergarter skal klassificeres med udgangspunkt i de mineraler, der krystalliserer fra forekomsternes smelte. Kun mikrofenokryster og grundmassen i kimberlittiske bjergarter kan med rimelig stor sikkerhed siges at være krystalliseret fra forekomsternes smelte. I 2005 publiceredes et nu generelt accepteret forslag til klassifikation af kimberlittiske bjergarter. Forslaget er baseret på den erfaringsmæssige petrografi og mineralkemi for klassiske kimberlittiske forekomster og følger de i 2004 i GEUS valgte principper for klassifikation af grønlandske forekomster. Navnet kimberlit blev begrænset til en gruppe af forekomster der ikke har klinopyroxen i deres grundmasse og i hvilke mikrofenokryster og grundmassekorn af spinel er Mg-rige og tilhører "magnesian-ulvöspinel trend", af ilmenit der er meget Mg-rig, og af phlogopit der er Fe- og Ti-fattig og zoneret mod bariumrig kinoshitalit. Kimberlittiske forekomster i Maniitsoq området opfylder disse kriterier og er nu anerkendt som kimberlit (sensu stricto). Stort set alle andre forekomster i Grønland har grundmasse-klinopyroxen og klassificeres som aillikitter eller mela-aillikitter. Aillikittiske bjergartstyper ses i Sarfartoq og Sisimiut områdernes forekomster og i de fleste andre områder i Grønland, hvor de med en lidt bredere term ofte er registreret som ultramafiske lamprofyrer. Den regionale variation i det sydlige Vestgrønland fra kimberlit i Maniitsoq syd til aillikit i Sisimiut i nord er resultat af stigende H₂O/CO₂, der viser sig i et stigende indhold af phlogopit, i forekomsterne og kildeområder i den lithosfæriske kappe. Det stigende indhold af phlogopit ses som resultat af den tidligere forudgående geologiske udvikling og magmatiske aktivitet.

Ifølge ovenstående er smelten i Maniitsoq kimbelit tæt på en primærsmelte opstået dybt i den lithosfæriske kappe. Kimberlittiske bjergarter er helt domineret af en grundmasse rig i serpentin- og karbonatmineraler og et stort indhold af olivin som større til ganske små fragmenter fra den lithosfæriske kappe og som korn krystalliseret fra smelte. En omfattende undersøgelse af Majuagaa gangen (Maniitsoq) viser at meget olivin og mindre ilmenit i gangen er fragmenter fra kappen. For at få sammensætningen af den oprindelige smelte må kappefragmenternes bidrag modregnes. Den beregnede kemiske sammensætning viser at smelten er karbonatrig og kan betragtes som en karbonatitisk smeltesammensætning. Traditionelt er kimberlitsmelte imidlertid anset for at være en silikatsmelte med stort indhold af volatiler og konklusionen af undersøgelserne i Maniitsoq kimberlitten er den modsatte. Smelten er karbonatitisk med et indhold af silica, dvs. en silikokarbonatit. Det er et fundamentalt skifte i opfattelse, som har stor betydning for forståelsen af bjergarternes oprindelse, kimberlittiske intrusioners dynamik, og transport og bevarelse af diamant.

Diamanter og kimberlit: Et historisk tilbageblik og aktiviteter i Grønland til årtusindskiftet

Til alle tider har diamanter været højt værdsat. De er små, har stor værdi, de kan let skjules og transporteres, er uforgængelige og er derfor det perfekte middel til sikring af værdier i urolige tider. Op gennem tiden er store berømte diamanter fra det indiske kontinent fundet i flodaflejringer, men deres oprindelse forblev ukendt. Billedet skiftede, da man i 1860'erne i Sydafrika fandt flodaflejrede diamanter hvor floderne Vaal, Orange og Riet løber sammen og kort efter diamanter i lerfyldte skålformede lavninger i Kimberleyområdet.

I Kimberleyområdet byggede man huset af ler fra små, til tider, vandfyldte lavninger kaldet "pans". I



Fig. 1: Diamantkrystal i sin kimberlittiske værtsbjergart: Foto: © Museum of Natural History, Smithsonian Institution, billede MSA 168, katalog nr. 120956.



Fig. 2. Diamantbrydning i slutningen af 1800-tallet i toppen af kimberlit kraterrør, Kimberly, Sydafrika. © De Beers hjemmeside, Photo Gallery.

leret på lokaliteten Dutoitspan blev fundet diamanter i 1869, men området blev i første omgang opgivet på grund af barskhed og mangel på vand. Det var ikke gået op for diamantjægerne at leret var omdannelsesproduktet af den underliggende diamantførende bjergart (Fig. 1). Under leret findes "yellow ground" og herunder "blue ground", begge betegnelser for omdannelsesprodukterne af vulkansk explosionsbreccie og tuf med mange inklusioner og diamanter. Det første diamant "rush" fandt sted på jord ejet af familien De Beers, et navn der siden har været uløseligt forbundet med diamanter og diamantindustrien (Fig. 2). Der er mange farverige beretninger om den tidlige diamantfeber i Sydafrika, f. eks. Roberts (1976), Lenzen (1980) og Wilson (1982). De lerfyldte lavninger er toppen af kegleformede kraterrør fyldt med kraterfaciesbjergart og tuf af kimberlittisk sammensætning (Fig. 3). Kraterrøret er dannet ved eksplosiv afgasning, især vanddamp og kulddioxid (CO2) – meget svarende til den eksplosionsagtige afgasning når en flaske champagne åbnes. Bjergarterne i kraterrøret kaldes for kimberlit (efter Kimberley) og jagten på diamanter foregår i områder med kimberlitforekomster.

Erfaringsmæssigt, og nu baseret på sunde viden-

skabelige argumenter, byder gamle kontinentområder på de bedste chancer for fund af diamantførende kimberlit. Ud fra denne overordnede erkendelse skulle den ældste del af det gamle grundfjeld i det sydlige Vest- og Østgrønland give mulighed for fund af kimberlittiske bjergarter og dermed diamanter. Kimberlittiske bjergarter i form af gange er da også blev fundet i forbindelse med geologisk kortlægning tilbage omkring 1970 (Andrews og Emeleus, 1971 og Goff, 1973), og de første mere detaljerede undersøgelser publiceredes af Scott (1981) og Thy et al. (1987). Potentialet for fund af diamanter blev aldrig undersøgt i større detalje og først med en samlet oversigt over alle kendte forekomster af kimberlittiske og relaterede bjergarter af Larsen (1991, se også Larsen og Rex, 1992) blev interessen for alvor vakt i efterforskningsindustrien.

Kimberlitforekomster er svære at finde, fordi de forvitrer let og derfor let bliver dækket af løse aflejringer, jord, sedimenter eller moræne i glaciale områder. En meget anvendt metode er en systematisk indsamling af prøver af overflademateriale i de områder, hvor kimberlitter kan tænkes at forekomme. Prøverne undersøges for indhold af mineraler, der er karakteristi-



Fig. 3: Udtømt diamantmine i et kimberlit kraterrør i Kimberley, Sydafrika. Kraterrøret har som det ses meget stejle sider og kan være flere hundrede meter dybt. Foto: © Petradiamonds hjemmeside, Photo Gallery.



Fig. 4: Diavik diamant minen i Northwest Territories, Canada. I forgrunden to kraterrør under brydning og i bagrunden et mindre tredje kraterrør. Forekomsterne ligger delvist på søbunden og minerne er beskyttet af diger. Foto: © Harry Winston hjemmeside.



Fig. 5: Den diamantbærende Majuagaa kimberlitgang, ca. 50 km SØ for Maniitsoq i det sydlige Vestgrønland. Gangen er ca. 2 meter bred, orienteret VSV-ØNØ, er stejl og kan følges mere end 2 km. (se tekst og Fig. 18b). Foto: Jakob Lautrup, GEUS.

ske for netop diamantbærende kimberlittiske bjergarter og resultatet kan bruges til at pege på de områder, hvor nærmere undersøgelser med fordel kan iværksættes. I 1990'erne gennemførte især kanadiske efterforskningsselskaber en omfattende og systematisk undersøgelse af hele det gamle kontinentområde i Sydvestgrønland suppleret med mere målrettede undersøgelser af enkeltlokaliteter. Med den øgede efterforskningsaktivitet voksede ønsket om et samlet overblik frem og GEUS samlede med støtte fra Råstofdirektoratet under Grønlands Hjemmestyre alle efterforskningsselskabers og egne data (Jensen et al., 2004a). Rapporten og den tilkyttede database er grundlag for en vurdering af efterforskningsmulighederne og et incitament for øget og mere intensiv selskabsefterforskning. En diamantindustri kunne bidrage til et bedre økonomisk fundament for Grønlands udvikling. Derudover åbner den store datamængde også for nye forskningsmuligheder, bl.a. en dybere forståelse af kimberlittiske bjergarters oprindelse og udvikling af metoder til sporing af dem og vurdering af deres prospektivitet.

Kimberlittiske bjergarters forekomstmåde

De nu udtømte kraterrør i Kimberley området i Sydafrika viser formen på den oprindelige forekomst af kimberlit i breccie- og tuf-facies. Kraterrør kan have mange forskellige former, have oplevet flere eksplosive faser og være meget kaotiske. Sammenlignet med kimberlitgange og sills har kraterrørene den store fordel at volumen og tonnage i kraterrørene er meget store, de kan i stort omfang tages i dagbrud, og samtidig er bjergarterne nemmere at bearbejde. Det modvejes delvist af deres ofte komplekse opbygning, hvor ikke alle intrusive faser nødvendigvis er diamantbærende. At finde et nyt diamant-bærende kraterrør er alle efterforskeres drøm. I de sidste årtier er drømmen gentagne gange blevet til virkelighed i Northwest Territories i Canada (Fig. 4), hvor Ekati og Diavik minerne i disse år leverer store mængder certificerede diamanter til verdensmarkedet (se minernes hjemmesider). Canada er nu verdens trediestørste diamantproducent.

Sværme af kimberlitiske gange er knyttet til mange kimberlittiske forekomster. De kan være komplekse med flere intrusive faser og bånding. Ofte ses også sen udskillelse af restsmelte i form af karbonatrige årer nære kontakten til værtsbjergarten (Fig. 8a). De grønlanske forekomster er ofte gange (Fig. 5), d.v.s. sprækkezoner udfyldt med kimberlittisk bjergart. Gangene er op til et par meter brede og kan følges over flere kilometer. De ser ud til at have udnyttet eksisterende svaghedszoner i værtsbjergarterne. Kontakterne bærer ikke præg af eksplosiv indplacering og det niveau, vi ser i dag, var antageligvis i en dybde og under et tryk, hvor volatiler i ikke væsentlig grad blev afgasset fra smelten i gangen - om man så må sige, forblev proppen i champagneflasken. I forbindelse med få gange ses udvidelser, også kaldet "blows". De kunne være bunden af egentlige kraterrør. Den bedst kendte "blow" er relateret til gangen Sarfartuup Nunaa Syd i det sydlige Sarfartoq område. Den viser, ligesom mange kraterrør, tegn på flere pulser af magma, endog af forskellig type (Fig. 6). I Vestgrønland findes kimberlittiske bjergarter også i fladtliggende gange



Fig. 6: Billede af tyndslib (ca. 35x20 mm) fra "blow" i "Sarfartuup Nunaa Syd" forekomsten, i Sarfartoq området, Grønland. Den ringformede tekstur har i midten en lille nodul fra den lithosfæriske kappe. Nederst i tyndslibet ses lidt af en stor ilmenit megakryst. Det brune mineral i nodulen er phlogopit. I øverste venstre hjørne ses kanten af endnu en nodul domineret af olivin. Ringene omkring nodulen består skiftevis af olivin, ilmenit og kromit. Den vekslende krystallisation tages som udtryk for mangel på kemisk ligevægt i systemet og blanding af flere smelter. Foto: GEUS.

kaldet sills. Disse sills er ofte præget af komplicerede intrusive relationer og ofte af flere pulser af magma. Et eksempel er den eneste prøvebrudte diamantforekomst i Grønland kaldet "Garnet Lake" (se senere, Hutchison og Frei, 2009), tæt på Sarfartuup Nunaa Syd forekomsten i det sydlige Sarfartoq område (se Fig. 20 og 21). Der er her tale om et hældende sill kompleks. At tilsvarende sills også kan udnyttes økonomisk eksemplificeres af De Beers' "Snap Lake" forekomst i Northwest Territories i Canada (se De Beers, Canada og Snap Lake hjemmesiderne).

Den sidste forekomstmåde for diamant, der skal omtales her, er aflejring i flodlejer og sandaflejringer. Før egentlig brydningen af kimberlitforekomster tog fart i Sydafrika, blev diamanter altid fundet på sekundært leje. Industrielt udvindes diamanter i dag fra udstrakte sandformationer langs Namibias kyst, på land såvel som i den kystnære havbund (Fig. 7). Selv om aflejringer i dale og i det kystnære miljø i Grønland kunne indeholde diamanter er de nok ikke prospektive, da mængden af morænemateriale er meget stor. Skulle diamanter være transporteret fra kilden i kimberlittiske gange til aflejringer i dale og langs kysten, ville diamanterne nok drukne i de store mængder moræne materialet



Fig. 7: Udvinding af diamanter med sandpumpe i løst alluvialt sand nær Namibias kyst. Foto: © De Beers' hjemmeside, Photo Gallery.



Fig. 8: Billeder af kimberlit blokke fra Grønland: a: Typisk overflade af kimberlit rig i noduler og megakryster. En 1-Euro mønt er målestok. Mellem noduler og megakryster nedbrydes den karbonatrige grundmasse og efterlader den karakteristiske nuprede overflade. De olivinrige noduler og olivin megakrysterne er brungule. Den store grønne megacryst består af klinopyroxen. Silisissanguit Tasiat kimberlit, Maniitsoqområdet , sydlige Vestgrønland. b: Kontakten af Majuagaa kimberlitgangen, Maniitsoq i det sydlige Vestgrønland. Målestokken er 2 cm. Den lyse værtsbjergart er gnejs. Kontakten er skarp og uden videre reaktion eller opsmeltning og ser ud til at være oprindelig betinget af sprækkedannelse. I kimberlitten ses en stor granat-megakryst, flere olivin (brungule) og ilmenit (sortgrå) megakryster, samt årer rige på karbonat (brungule). Foto: a: GEUS, b: Jakob Lautrup, GEUS.



Kimberlittiske bjergarter, hvad består de af?

Kimberlittiske bjergarter er blandt de mest heterogene magmatiske produkter på jorden. Det umiddelbart mest karakteristiske for bjergartsgruppen er indholdet af bjergartsfragmenter fra jordens kappe, i fagsproget kaldet noduler. Der er også mange korn og krystaller af enkelt-mineraler. De kaldes xenokryster (Fig. 8a og b). Når de er meget store, kaldes de megakryster, og med aftagende størrelse benævnes de makrokryster og mikrokryster. De er alle fragmenter opsamlet i kildeområdet eller på den kimberlittiske smeltes vej op til de øvre dele af jordskorpen. Traditionelt er kimberlittiske bjergarter identificeret og navngivet på netop deres indhold af noduler og xenokryster. Det er imidlertid i modstrid med de gældende internationale IUGS-principper for klassifikation af magmatiske bjergarter (Le Maitre, 2002). En magmatisk bjergart skal klassificeres med udgangspunkt i de mineraler, der er krystalliseret fra smelten i forekomsten.

Kimberlittiske bjergarter er magmatiske bjergarter, fordi de er størknet fra en smelte, uanset at smelten har indeholdt mange noduler og xenokryster. Men klassifikationen af de meget heterogene kimberlittiske bjergarter er svær uden international enighed om principper for identifikation af smeltens krystallisationsprodukter versus tilfældigt opsamlet kappemateriale. Her bruges indtil videre betegnelsen "kimberlittiske bjergarter" og ikke bare kimberlit for forekomsterne i Grønland, på grund af den manglende enighed. I det følgende illustreres kimberlittiske bjergarters heterogenitet, herunder noduler, mega- og makrokryster, mikrokryster og fenokryster (små velkrystalliserede mineralkorn), og en ofte meget finkornet og kompleks grundmasse.

Noduler

Det grundfjeld, vi kender f.eks. fra Bornholm og i kontinentalområder, når ned i en dybde på 20-40 km og i nogle områder dybere. Under skorpens grundfjeld følger den lithosfæriske kappe. Den lithosfæriske kappe består af tunge, relativt kolde og ultramafiske bjergarter fæstnet til bunden af den kontinentale skorpe. De mange bjergartsfragmenter i kimberlittiske bjergarter er fragmenter af den kontinentale kappe. Kimberlittiske bjergarter er derfor ikke kun interessante for deres indhold af diamant, men også fordi de indeholder prøver fra de dele af jorden, vi ellers ikke har adgang til. Der er mange forskellige bjergartstyper i den lithosfæriske kappe, men de er altovervejende domineret af mineralet olivin. De øvrige væsentlige mineraler er orthopyroxen, klinopyroxen, granat og spinel. Grundlaget for navngivningen af kappe bjergarter er mængdeforholdet mellem disse mineraler (Le Maitre, 2002). Med et samlende navn kaldes bjergarter domineret af olivin, orthopyroxen og klinopyroxen for peridotitter.

I kappebjergarter er mineralet spinel stabilt ned til dybder på 60-80 km afhængigt af temperaturen, herunder erstattes det af granat. Forekomst af spinel og granat i noduler giver derfor en indikation på den dybde en nodul stammer fra, og bruges som præfiks for kappebjergarterne. Bjergarter helt domineret af olivin kaldes dunit, bjergarter bestående af olivin og en mindre mængde orthopyroxen kaldes harzburgit (Fig. 9a), og bjergarter med olivin, orthopyroxen og klinopyroxen kaldes lherzolit (Fig. 9b). Alt efter deres indhold af spinel eller granat klassificeres noduler så som spinel- eller granatlherzolit, spinel- eller granatharzburgit, og så videre. Andre bjergarter helt domineret af pyroxen kaldes pyroxenitter, og bjergarter med meget phlogopit kaldes glimmerit (fig. 9c). De to sidstnævnte bergartstyper er begge resultatet af reak-

Maniitsoq i det sydlige Vestgrønland. De rødlige granatkorn er tydeligt afrundede og omgivet af en reaktionsrand. Resten af nodulen betår at orthopyroxen i en masse af fine olivinkorn dannet ved mekanisk knusning. Nodulen siges at have en mylonitisk tekstur. Sammenlignet med grundmassen i bjergarter fra "blow" ved Sarfartuup Nunaa Syd (Fig. 6) er grundmassen her uden brun phlogopit. b: Tyndslib (ca. 35x20 mm) af granat lherzolit nodule, Majuagaa gangen, Maniitsoq i det sydlige Vestgrønland. Hovedmineralerne er olivin (klart og farveløst) og klinopyroxen (grønt). I slibet ses få små granatkorn og mindre orthopyroxenkorn. De sorte krystaller i nogle klinopyroxen korn er mineralet kromit. De uregelmæsssige grumsede området delvist omgivet af radiære sprækker er rige i dolomit, serpentin Ba- og Sr-karbonat, og et jern-rigt mineral – antagelivis magnesioferrit. Den mørke farve skyldes et stort antal blærerum. De uregelmæssige grumsede områder antages at være karbonatitisk smelte fra de nederste dele af den lithosfæriske kappe. c: Tyndslib (ca. 26x20 mm9 af glimmerit nodul i phlogopit-rig kimberlittisk bjergart fra "blow" ved Sarfartuup Nunaa Syd, det sydlige Sarfartoq område. Glimmerit nodulen udgør den højre side af tyndslibet. Kontakten til værtsbjergarten er skarp. Glimmerit nodulen er pyroxen-rig, i modsætning til værtsbjergarten. d: Eklogit nodul fra Majuagaa gangen, Maniitsoq i det sydlige Vestgrønland. Målestokken er 2 cm. Nodulen består stærk grøn klinopyroxen og granat som de to helt dominerende faser. Totalsammensætningen svarer til en basaltisk sammensætning rekrystalliseret under højt tryk dybt i den lithosfæriske kappe. Værtsbjergarten er kimberlit med megakryster af olivin, ilmenit, klinopyroxen og granat. Grundmassen er karbonatrig. Foto a-c: GEUS, d: Jakob Lautrup, GEUS.

tion mellem peridotitiske bjergarter og smelte og/ eller volatiler dybt i den lithosfæriske kappe. Pyroxenitter og glimmeritter siges at have været udsat for metasomatose. En sidste, men i en del sammenhænge vigtig gruppe af kappebjergarter er eklogit. Det er en bjergart karakteriseret af ofte stærk grøn klinopyroxen og en rød til orange granat (Fig. 9d). Eklogit er oprindelig en bjergart af basaltisk sammensætning (plagioklas, pyroxen, magnetit, ilmenit, olivin), der under højt tryk og temperatur i kappen er re-krystalliseret til eklogit.

Mega- og makrokryster

Mega- og makrokryster er enkeltmineral korn af de mineraler, der også findes i noduler. De er ofte smukke, især rød, orange eller næste lilla granat og græsgrøn klinopyroxen (Fig. 8a og b, Fig. 13). De er nemme at genkende og er derfor vigtige i mineralefterforskningen. De øvrige almindelige mega- og makrokryster er olivin, orthopyroxen, spinel (varieteten kromit), phlogopit (magnesium-rig glimmer), og mineralet ilmenit. Er mega- og makrokryster store krystaller vokset fra kimberlittens smelte, eller er de fragmenter samlet op i kildeområdet eller på kimberlittens vej op gennem den kontinentale lithosfære? Uenigheden er stor. Men det er i første omgang lige meget. Makrokrystselskabet er meget karakteristisk for kimberlittiske bjergarter, og det er helt forståeligt, at det tidligere har været grundlag for klassifikationen af kimberlittiske bjergarter.

Diamanter er også makokryster bragt med op fra jordens dyb, i sjældne tilfælde også megakryster af



Fig. 10: Rå diamant på 507 karat fra Cullinan minen i Sydafrika. Diamanten måler ca. 10 cm på længste led. Store diamanter har egne navne og denne hedder "Cullinan Heritage". Den blev solg for ca. 35 millioner amerikanske dollar. © Petra Diamonds

meget stor værdi (Fig. 10). Diamant består af kulstof og naturlige diamanter dannes først ved et tryk svarende til en dybde på ca.150 km i den lithosfæriske kappe. Fra 150 km´s dybde til bunden af den relativt kolde lithosfæriske kappe i måske 200-230 km´s dybde kan diamant dannes. Dybdeintervallet kaldes "diamant-vinduet".

Mikrokryster og fenokryster

Små korn af olivin, og andre mineraler kaldes mikrokryster. Hvis de er velkrystalliserede betegnes de fenokryster. Fenokrysternes rande antages som et minimum at være krystalliseret fra værtsbjergartens smelte (Fig. 11a). Udover olivin findes en række af andre velkrystalliserede mineraler der alle anses for at være krystalliseret fra den kimberlittiske smelte. Nemmest at genkende er phlogopit der viser lyse rande i BSE-billeder (back scatter electron) som følge af højt bariumindhold, d.v.s., høj gennemsnits atommasse (Fig. 11b). Andre almindelige faser er spinel (titan-rig magnetit, de lyse kasseformede krystaller i fig. 11b), kromit, ilmenit, perovskit og apatit, der alle skal findes under mikroskopet. Mange andre mineraler er registreret i kimberlittiske bjergarter, men det ville føre for vidt her at gennemgå dem alle (se f. eks. Mitchell, 1986).

Grundmassen

Kimberlittiske bjergarter er rige på volatiler, især H_2O og CO_2 . Derudover indeholder kimberlitter varierende mængder af, f.eks. S, Cl, F. Følgen heraf er, at mange kimberlitter er stærkt påvirket af intern omdannelse. I indledningen brugtes betegnelserne "yellow ground" og "blue ground" om omdannelsesbjergarterne over de kimberlittiske breccier i eksplosionskratere

Den gule farve skyldes rustfarvning fra jern og den blålige farve skyldes farven på magnesium-rige sepentinmineraler. I frisk kimberlit er grundmassen domineret af kalkspat, dolomit og serpentinmineraler. Grundmassen er en tæt masse (Fig.11b), mere eller mindre rig på serpentin og ofte mange uregelmæssige og mikroskopiske fragmenter af olivin, her kaldet "olivinmel". I nogle kimberlittiske bjergarter ses også klinopyroxen og phlogopit sammen med en meget lang række andre mineraler i ofte ganske små eller større korn vokset omkring andre faser. Der er her tale om f.eks., apatit, baryt og djerfisherit (K, Mg, Fe sulfid). Grundmassen er rig på serpentinmineraler og karbonat mineraler (kalkspat og dolomit) og i nogle typer også phlogopit, men p.gr.a. højt volatil indhold og udbredt reaktion er det vanskeligt at give en generel beskrivelse af kimberlittisk grundmasse.



Fig. 11. Detaljer af Majuagaa gangens grundmassemineralogi vist som backscatter billeder fra elekton mikrosonde. Desto lysere mineralkornene er, desto større er deres gennemsnitlige atomvægt a: Billede af fragmenteret olivin makrokryst og olivin fenokryst med uregelmæssig kerne. Rande er tonet grå, p.gr.a. lavere atommasse som følge af højere forsterit. Den uregelmæssige kerne i fenokrysten viser også zonering fra fra mørkere til lysere svarende til et højere forsterit indhold i kernen. Målestok (10 µm) i nederste højre hjørne. Majuagaa gangen, Maniitsoq regionen. b: Detalje af grundmasse visende op til 100 µm store phlogopitkrystaller i grundmasse fra Maniitsoq type kimberlit. De hvide rande skyldes højre gennemsnits atommasse som følge af berigelse i bariun. De karakteristiske lyse mineralkorn er velkrystalliseret Ti- og Mg-rig spinel. Krystaller uden midte kaldes atoll spinel, der er karakteristisk for kimberlit (sensu strictu). Majuagaa gangen, Maniitsoq regionen (Nielsen & Sand, 2008).

Diamantefterforskning i Grønland

Jagten på kimberlittiske forekomster i Grønland Indholdet af diamant i selv gode forekomster er

uhyre lille. Måske ½ gram per ton bjergart. Mange diamanter er meget små (under 1/2 mm; også kaldet mikrodiamanter), og dem er det ikke lønsomt direkte at lede efter. Kimberlittiske forekomster kan man derimod lede efter, selv om de heller ikke er nemme at finde. Diamantefterforskning består således i eftersøgning af kimberlittiske forekomster efterfulgt af test af diamant indhold. Alt efter forholdene i det geologiske terræn, man vil undersøge, kan man benytte flere forskellige metoder. I områder med megen vegetation, dækkende jordlag, eller i snedækkede egne ses kimberlittiske forekomster ikke, og f.eks. i Northwest Territories i Canada er geofysiske undersøgelser brugt i udstrakt grad. Kimberlittiske bjergarter er meget tunge og kan findes med tyngdemålinger og flere typer af magnetiske og elektromagnetiske metoder, såfremt den fysiske kontrast mellem forekomst og værtsbjergarter er tilstrækkelig stor. Er bjergarterne i dagen kan de også søges i flyfoto eller mere avanceret ved brug af hyperspektrale metoder (Tukiainen og Thorning, 2004). I jagten på kimberlittiske kraterrør ledes efter mere eller mindre runde anomalier, gerne under søer. De kunne fylde lavninger i forvitrede og nederoderede kraterrør – meget lig de lerfyldte "pans" i Kimberley området i Sydafrika (se indledningen). Andre metoder baserer sig på systematisk indsamlede overfladeaflejringer (Steenfelt, 2009). Én metode fokuserer på koncentration og kemisk sammensætning af især granat, pyroxen, chromit, ilmenit, olivin med mulig oprindelse i diamantførende kimberlittiske bjergarter og en anden på geokemisk kortlægning. Begge metoder bruges som opfølgning til de geofysiske metoder.

De mineralogiske og kemiske metoder kræver detaljerede oplysninger om de enkelte mineralers kemiske sammensætning og overfladeaflejringernes indhold af mange sporelementer, d.v.s. grundstoffer, der findes i meget små mængder. I det grønlandske efterforskningarbejde viste det sig at f.eks. indholdet af niobium (Nb) var højt på lokaliteter med kendte kimberlittiske forekomster (Steenfelt et al., 2009). Med andre ord, et i forhold til det omgivende terræn højt indhold af niobium i analyser af overfladeaflejringer kunne tyde på en kimberlittiske forekomst i nærområdet (Fig. 12). Opkoncentration af Nb forekommer også i karbonatitiske bjergarter og en Nb-anomali er ikke i sig selv et entydigt tegn på forekomst af kimberlittiske bjergart, men en indikation der bør følges op.

Mange steder på Jorden er undersøgelser af overfladeaflejringer for mineraler karakteristiske for kimberlittiske bjergarter den mest effektive måde at find forekomster på. I efterforskningsindustrien kaldes mineraler, der entydigt stammer fra diamantførende kimberlittiske bjergarter, for "indikatormineraler" (Fig. 13). Overfladeaflejringer kan være transporteret over store afstande og man kunne tro at metoden ikke var så anvendelig i det grønlandske landskab formet af gletschere og elve fra Indlandsisen. Systematiske undersøgelser viser imidlertid at selv i Grønland kan metoden bruges med succes (Steenfelt *et al.*, 2009a). Indikatormineralanomalier er tæt knyttet til deres oprindelsesbjergart. På de lokaliteter hvor indikatormineralernes kemiske sammensætning viser en oprindelse i diamantvinduet, er der en teoretisk chance for at finde diamant. En del af grundlaget for brugen af indikatormineralerne er den kemiske sammensætning af samme mineraler der som ganske små korn er indeholdt i naturlige diamanter.

Det vigtigste indikatormineral er granat. Granat kan stamme fra mange forskellige bjergarter og af interesse er kun de typer af granat, der vides at stamme fra bjergarter i diamantvinduet. I flere årtier er granat fra alle dele af jorden systematisk analyseret, og det vides nu, at granat tilhørende sammensætningsgrupperne G9, G10 (med undergruppen G10D) og G11 og granat fra eklogittiske bjergarter henført til sammensætningsgruppe G3 har oprindelse i de dybder i lithosfærekappen, hvor diamant dannes (Fig. 14, Mitchell, 1986). Figur 14 viser mængdeforhold for G9, G10 og G11 granat fra prøver samlet af efterforskningsselskaber over store dele af Sydvestgrønland. Variationen afspejler af bjergartsvariationen for 600-550 millioner år siden i de dybder, hvor diamant kan dannes.

Indikatormineralernes kemiske sammensætninger giver mange andre oplysninger. F. eks., afslører sammenhængen mellem aluminium- og kromindholdet i



Fig. 12: Kort over området fra Maniitsoq i syd til Sisimiut i nord visende koncentrationen af niob (Nb) i bæksedimenter som symbolplot i farver efter koncentrationen. Høje værdier findes i området Ø for Maniitsoq og i store dele af Sarfartoq regionen. Kimberlit indeholder 100-200 gange mere niob end de omgivende bjergarter, og den øgede koncentration i bæksedimentprøverne viser hyppigheden af kimberlittiske bjergarter i disse områder. (Udarbejdet af A. Steenfelt, 2011, se også Steenfelt et al. 2009b).

klinopyroxen hvilken peridotitisk bjergart de kommer fra. Granatførende kimberlittiske bjergarter indeholder ofte også mineralerne ilmenit og kromit. Karakteristisk for disse jern-rige mineraler fra diamantvinduet i den lithosfæriske kappe er et højt indhold af magnesium (Mg). Forekomst af høj-Mg ilmenit i overflade aflejringer er klare tegn på et potentiale for kimberlittiske bjergarter og bruges i udstrakt grad af selskaber i efterforskningen i Grønland. Mere end 43.000 analyser har selskaber udført på ilmenit i jagten på kimberlittiske forekomster i Grønland (Fig. 15). Som en bonus til den efterforskningsmæssige brug af indikatormineraler er det af GEUS sammenstillede data sæt internationalt værdsat og bruges i udviklingen af mere universelle metoder og principper for brugen af indikatormineraler i efterforskningsmæssig sammenhæng (Grütter, 2009, Grütter og Tuer, 2009).

Som et sidste check på oprindelsen af mineralkorn kan det tryk og den temperatur hvor, f.eks. klinopyroxen var i ligevægt med kappeperidotit også beregnes. Bedst beregnes tryk og temperatur i noduler, hvor mineralkornene sidder side om side og er i ligevægt med hinanden. Tryk og temperatur er afgørende for fordelingen af mange grundstoffer mellem faserne. Et eksempel på en sådan beregning af sammenhængen mellem tryk og temperatur i den lithosfæriske kappe er her vist for vestgrønlanske noduler (Fig. 16). Illustrationen stammer fra et arbejde der bl.a. giver indblik i oprindelsesdybden for noduler i kimberlittiske forekomster i Maniitsoq-Sisimiut regionerne i Vestgrønland (Sand, 2007).



Fig. 13: Indikatormineraler fra det sydlige Vestgrønland. De violette til blå korn er G10 granater fra peridottitiske bjergarter i diamantvinduet, de rød-orange korn er G3 granater fra en eklogitisk bjergart og de grønne korn klinopyroxen, varietet kromdiopsid. Foto: GEUS.

Test for diamanter

Alle de omtalte metoder har til formål at indkredse kimberlittiske bjergarter med rod i diamantvinduet og har ført til fund af mange kimberlittiske forekomster i Grønland (se Fig. 20). Når en forekomst af kimberlittiske bjergarter lever op til alle de mineralogiske og mineralkemiske kriterier for en oprindelse i diamantvinduet kan bjergarten indeholde diamant, men det er langt fra sikkert og forekomsten skal testes. Normalt testes bjergarter for deres værdifulde mineraler under mikroskopet eller med kemiske analyser. Ingen af disse metoder er brugbare for diamanter. Der er så lidt diamant, at man skal være mere end umådelig heldig for at finde en diamant i et tyndslib – også fordi diamanterne ville bliver revet ud af slibet under dets fremstilling. At finde et håndstykke med en diamant er et mirakel. Kemiske metoder er heller ikke anvendelige. Diamanter består af kulstof lige som en ofte stor del af grundmassen i kimberlittiske bjergarter (kalkspat og dolomit), og kemiske analyser kan ikke vise om en kimberlittisk bjergart indeholder diamanter.

Med de meget små indhold af diamant skal enhver test gennemføres på en meget stor prøve for at give statistisk mening. GEUS udførte sine tests på såkaldte "mini bulk prøver" på omkring 1000 kg materiale. Testen er i princippet simpel: Bjergarten knuses og opløses. Diamanter og andet uopløst materiale samles op, vaskes og sendes til videre undersøgelse. I virkelighedens verden er det en omfattende, vanskelig og kostbar proces på grund af de store mængder af materiale, der skal behandles, og på grund af de meget



Fig. 14: Variationen i mængdeforholdet af G9, G10 og G11 granater i overfladeprøver fra det sydlige Vestgrønland. G10 granat er normalt relateret til harzburgittiske bjergarter i diamantvinduet og meget almindelige i Sarfartoq regionen. G11 granat, der normalt er relateret til lherzolittiske bjergarter i diamantvinduet er dominerende i Maniitsoq regionen (udarbejdet af A. Steenfelt, 2011, se også Steenfelt et al. 2009b for yderligere anvendelse af kemiske data fra indikatormineraler).

små mængder af meget små diamanter der skal fanges i processen. Private selskaber har specialiseret sig i sådanne test og et eksempel herpå er test af 3 kimberlittiske forekomster udført af GEUS (Jensen *et al.*, 2004b).

Resultatet af testen er det totale diamantindhold i milligram og karat per ton, opmåling af korns størrelse, og bedømmelse af kornenes farve og kvalitet. Resultatet for Majuagaa gangen fra Maniitsoqregionen er vist i Tabel 1. I mineralefterforskning kræves langt større prøver og en egentlig prøveproduktion for at opnå en tilstrækkelig statistisk sikkerhed. Alt efter værtsbjergartens beskaffenhed udvikles processer der findeler bjergarten uden at knuse for mange diamanter og derefter koncentrerer diamanterne. Garnet Lake forekomsten i den sydlige del af Sarfartoqregionen er den eneste grønlandske forekomst, hvor en prøveproduktion til brug for vurderingen af lønsomhed har fundet sted. Anlægget er en lille og kostbar fabrik, der kan behandle flere tusinde tons bjergart, og en nødvendighed for udviklingen af en diamantforekomst (Fig. 17). De fundne diamanter giver en langt bedre mulighed for vurdering af indhold, kvalitet og størrelsesvariation. Det sidste er vigtigt. Ud fra kornstørrelsesvariation kan modeller beregnes for, hvor store diamanter, der er mulighed for at finde i en given



Fig. 15: Variation af TiO₂ og MgO i ilmenit fra indikatormineralprøver fra Vestgrønland. Diagrammet benyttes til identifikatioin af ilmenit med oprindelse i diamantvinduet. De over 43.000 analyser viser at en stor del af den ilmenit der kan findes i Vestgrønland har en oprindelse i diamantvinduet (Jensen et al., 2004a). I området mellem de to røde kurver oprindelsen af ilmenit usikker.

Fig. 16: Eksempel på geotherm (temperaturstigning med dybde, dvs stigende tryk udtrykt i giga Pascal (GPa), i lithosfæren). Figuren viser korreleret tryk- og temperaturbestemmelse for noduler fra det sydlige Vestgrønland. Diamants stabilitet fra tryk på 4-4.5 GPa svarende til 130-140 km's dybde og til bunden af den lithosfæriske kappe ved 7GPa svarende til 222 km's dybde giver et op til 90 km dybt diamantvindue under den kimberlittiske aktivitet for 600-550 millioner år siden. (Sand 2007).

forekomst. Diamanter bliver også knust i udvindingsprocessen og optimering af udvindingsmetoden kan føre til væsentlig forøgelse af en forekomsts værdi.

Fra Garnet Lake prospektet er der fundet diamanter i pæne kvaliteter til op mod 2,4 karat (0,5 gram, (Fig.18a). Forekomst af ravfarvede og lyserøde diamanter gør Garnet Lake prospektet mere interessante (Fig. 18b). Men her i 2012 er diamantefterforskningen i det sydlige Vestgrønland på vågeblus og venter på, at verdensmarkedet igen gør det lønsomt at forsætte efterforskningen.

Mineralkemisk klassifikation

Ønsket om en mere detaljeret viden om kimberlittiske bjergarter i Grønland udsprang ikke kun af videnskabelige grunde, men også markedsføringsmæssigt fordi Mitchell *et al.* (1999) konkluderede, at der i Grønland ikke fandtes "ægte" kimberlitter, men kun kimberlittiske bjergarter kaldet aillikitter eller melnoitter. Aillikitter adskiller sig fra kimberlitter ved at have klinopyroxen i grundmassen og melnoitter ved at indeholde melilit. Mitchell *et al* (1999) viste fra et be-



Fig. 17: Anlæg til testproduktion af diamant ved Garnet Lake, Hudson Resources Ltd. (se beliggenhed i Fig. 20). I anlægget knuses og sorteres den diamantholdige bjergart. Et koncentrat af tunge mineraler er produktet. Koncentratet sendes videre, eventuelt til håndsortering. © Hudson Resources Inc.



Fig. 18: Eksempler på diamantkorn udvundet fra grønlandske forekomster. a: Den største grønlandske diamant til dato. Stenen fra Garnet Lake forekomsten er på 2.4 karat og knap 1 cm i diameter. b: Lyserød diamant på ca. 0,5 mm fra Majuagaa gangen, Maniitsoq. Foto: a) © Hudson Resources Inc., b) GEUS.

grænset antal forekomster, hovedsagelig i Sarfartoqområdet, at de fleste undersøgte forekomster har grundmasse-klinopyroxen og foreslog, at alle kimberlitter i hidtil publicerede grønlandske rapporter nu skulle omklassificeres til aillikitter eller muligvis melnoitter. Efterforskningsindustrien tænder på ordet kimberlit og skulle det virkelig være rigtigt, at der ikke fandtes "ægte" (sensu stricto) kimberlitter i Grønland? Råstofdirektoratet under Grønlands Hjemmestyre og GEUS ønskede dette spørgsmål belyst og iværksatte derfor en større udredning baseret på tidligere indsamlet og registreret prøvemateriale (se Jensen *et al*, 2004a).

Klassifikationskriterier

Klassifikation af kimberlittiske bjergarter er ikke simpel på grund af bjergarternes heterogenitet. En basalt er klassificeret på basis af de faser, der krystalliserer fra dens smelte og kimberlittiske bjergarter skal klassificeres efter samme princip (Le Maitre, 2002). Problemet er, at der langt fra er enighed om, hvad der anses for krystalliseret fra den kimberlittiske smelte, og hvad der anses for at være opsamlet fast xenokrystisk (krystalkorn) og xenolittisk (bjergartsfragmenter) materiale. Problemet er især knyttet til mineralet olivin, der udgør op til 50 volumen % eller mere af kimberlittiske bjergarter. Mitchell (1995) beskriver i stor detalje kimberlittiske bjergarter fra store dele af verdenen, og hans arbejde er en væsentlig del af grundlaget for en revision af klassifikationskriterier for kimberlittiske bjergarter. I modsætning til den pragmatiske brug af inklusioner i kimberlittiske bjergarter slår Mitchell (1995) fast, at en klassifikation må baseres på, hvad der med sikkerhed vides at være krystalliseret fra smelten i en kimberlittiske forekomst, d.v.s. grundmassen og små krystaller i grundmassen. På basis af de af Mitchell kompilerede data og den i 1990'erne stærkt stigende mængde af mineralkemiske informationer for kimberlittiske bjergarter, opstiller Tappe et al. (2005) et klassifikationssystem i overensstemmelse med IUGS principper (Fig.19). Vigtigst for klassifikationen er, at grundmassens mineraler og deres mineralkemi er kendt. På linje med Nielsen og Jensen (2005, baseret på Mitchell, 1995) defineres kimberlit (sensu stricto) som en ultramafisk magmatisk bjergart, hvor grundmassen ikke har klinopyroxen,





Fig. 19: Flow diagram der viser klassifikation af kimberlittiske og relatered bjergarter, efter Tappe *et al.* (2005). hvor jern-titan mineralerne spinel (Ti-rig magnetit) og ilmenit er særdeles magnesium-rige, og hvor phlogopit er titan- og jernfattig med en randudvikling mod stigende bariumindhold og phlogopit-endeleddet kinoshitalite. Under ingen omstændigheder må en bjergart, der klassificeres som kimberlit (s.s.), udvise en zonering i grundmasse-phlogopit mod tetraferriphlogopit. Desuden skal bittesmå velformede spinelkorn (Fig. 11b) ubetinget høre til typen "magnesian ulvöspinel trend" (se Mitchell, 1995).

De krævede informationer opnås ikke ved studiet af håndstykker eller tyndslib, men ved en systematisk mineralkemisk undersøgelse. Principielt skal alle bjergarter kunne klassificeres ved hjælp af håndstykke og lup, et princip, der desværre ikke er brugbart for kimberlittiske bjergarter. De mineralkemiske undersøgelser er en forudsætning og kræver systematiske mikroanalyser af de små (ned til 10 mikrometer store) grundmassekorn af mineralerne spinel (Timagnetit), ilmenit og phlogopit, samt rekognosceringsanalyser i resten af bjergarten. Desto mindre og desto mere velkrystalliserede kornene indlejret i grundmassen er, desto større er muligheden for, at de er krystalliseret fra forekomstens smelte og karakteristiske for smeltens kemiske sammensætning. Mineralkemiske data illustreres bedst i diagrammer, hvori også klassifikationskriterier kan integreres (Fig. 22-24). Der er mange navne for varianter af kimberlittiske bjergarter (se Fig. 19), men relevant for de grønlandske forekomster er bjergartstyperne kimberlit, aillikit og karbonatit. Melnoit forslået af Mitchell et al. (1999) kan ikke udelukkes at forekomme i sydvest Grønland, men mangel på melilit eller omdannelsesprodukter af samme i de undersøgte bjergartstypers grundmasse synes at udelukke forekomst af melnoit.



Fig. 20: Kendte forekomster af kimberlittiske bjergarter (mørke cirkler), d.v.s. egentlige kimberlitter og relaterede ultramafiske lamprofyrer (UML) og karbonatit intrusioner (blå firkanter) i det sydlige Vestgrønland. Gule romber viser kimberlittiske forekomster med påvist diamantindhold (udarbejdet af Agnete Steenfelt, 2011, se også Steenfelt er al., 2009a).

Regionale mineralkemiske undersøgelser i det sydlige Vestgrønland

Kimberlittiske forekomster i Grønland.

De grønlandske forekomster findes hovedsaglig i området fra fjorden *Sisimiut Isortuat* (Nordre Isortoq) nord for Sisimiut til Nuuk-området i syd med flere forekomster ved Tikiussaq (Steenfelt *et al.*, 2006), Tappe *et al.*, 2009), Nunatak 1390 SØ for Nuuk (Sand *et al.*, 2007), længere mod syd ved Nigerdlikasik (Andrews og Emeleus, 1971) og Pyramidefjeld længst i syd (Hutchison *et al.*, 2007). Andre forekomster af beslægtede bjergarter findes i Narssarssuaq området og øst herfor i Danell Fjord området på Grønlands østkyst, omkring Ivittuut, Paamiut (Frederikshåb), Kangerluarsoruseq (Færingehavn) og i Disko Bugt området (se Larsen 1991). Hovedområderne for kimberlitforekomster er dog regionerne omkring Maniitsoq, Sarfartoq og Sisimiut (Fig. 20), hvor kimberlittiske bjergarter findes i form af gange og sills. De udgør en ikke ubetydelig komponent i den kontinentale skorpe og repræsenterer en væsentlig magmatisk aktivitet for 550 til 600 millioner år siden (Secher *et al.*, 2009). Kortet over forekomsterne viser også alle de steder, hvor diamant er registreret. Mange af diamanterne er ganske små, men de viser en meget vigtig ting: Diamant findes i bjergarterne og diamant er bevaret. Der er derfor en teoretisk mulighed for at finde diamanter af økonomisk interesse, selv der hvor kun mikroskopiske diamanter hidtil er fundet.

Ud fra informationer om forekomsterne af kimberlittiske bjergarter i det sydlige Vestgrønland i Jensen *et al.* (2004a) udvalgtes 27 lokaliteter fra Maniitsoq området i syd til Sisimiut området i nord til (Fig. 21). For alle lokaliteter gjaldt at de enten havde et dokumenteret indhold af diamant eller at deres indikator-



Fig. 21: Udvalgte lokaliteter for prøver brugt til regionale mineralkemiske undersøgelser udvalgte (Nielsen et al., 2009). Kendte forekomster (grå) og udvalgte (røde) samt grænsen for Palæozoisk deformation (se betydning heraf senere). mineralselskab viste et potentiale for diamanter. Med andre ord, alle lokaliteterne ville i "klassisk" forstand være kimberlitforekomster. Fra alle lokaliteter udvalgtes flere prøver for at sikre en både dækkende og meningsfuld undersøgelse. I alle prøver tilstræbtes et minimum af 20 enkeltanalyser fra hver mineralgruppe for at give en rimelig sikkerhed for konklusionerne. Alle analyserne blev checket for sum og stoikiometri (overensstemmelse med den teoretiske formel for et mineral og beregnet formel). Kun hvad der må betegnes som kvalitets analyser er benyttet i sammenstillingen af data (>4000 analyser). Alle analyser og alle baggrundsmaterialer kan findes i Nielsen et al. (2009) og tilknyttede digitale appendiks eller ved henvendelse til forfatteren). Resultaterne af analysearbejdet af grundmassemineralerne spinel, ilmenit og phlogopit ses i fig. 22-24.

Mineralkemiske resultater

Spinel

De små korn af spinel er ofte velformede krystaller (Fig. 11b). Sammensætningsmæssigt spreder de sig fra magnesium-rige til magnesium-fattige, alt efter region



Fig. 22: Variation i kemisk sammensætning af grundmassespinel i det sydlige Vestgrønland. Spinel fra Maniitsoq regionen (blå) ligger i det venstre felt der karakteristisk for grundmassespinel korn fra kimberlit (s.s.). De få Maniitsoq analyser til højre for feltet er fra Goff lokaliteten der grænser op til Sarfartoq regionen. Spinel fra Sarfartoq (grøn) og Sisimiut (solgul) falder i den højre del af diagrammet omkring et felt der er defineret af grundmasse-spinel i kimberlit-lignende bjergarter (kimberlite 2 m. fl., Mitchell 1995, Nielsen et al., 2007).

(Fig. 22). Uden tvivl er grundmasse-spineller fra Maniitsoq regionen alle magnesium-rige (lavt Fe²⁺/ (Fe²⁺+Mg) og opfylder dermed krav til spineller fra "ægte" kimberlitter som tilhørende "magnesianulvöspinel-trend" også kaldet "Magmatic Trend 1"(Mitchell, 1995 og Tappe *et al*, 2005, fig. 19). Til sammenligning er spineller fra kimberlittiske bjergarter fra Sarfatoq og Sisimiut regionerne langt fattigere på magnesium (bortset fra kromit i bunden af diagrammet) og falder uden for det empiriske sammensætningsfelt for spineller fra kimberlitter (s.s.). Sarfartoq og Sisimiut spinellerne har sammensætninger, der kan svare til flere bjergartssuiter og er derfor ikke entydige i klassifikationssammenhæng.

Ilmenit

Sammensætningen af grundmasse-ilmenit fra Maniitsoq området adskiller sig, som spineller, fra ilmenit fundet i grundmasserne fra Sarfartoq og Sisimiut områderne (Fig. 23). Udover at ilmenit er en meget almindelig grundmassefase i Maniitsoq og mere sjælden i Sarfartoq og især Sisimiut regionen, er Maniitsoq grundmasse-ilmenit endog meget Mg-rig med op til 25 vægt% MgO. I Sarfartoq og Sisimiut regionerne falder MgO til 15 vægt % eller derunder. Især i Sisimiut regionen er ilmenit en sjældnere og ofte omdannet fase. Det regionalt faldende indhold af ilmenit synes delvist kompenseret af et stigende indhold af grundmasse-perovskit (CaTiO₃).



Fig. 23: Variation i kemisk sammensætning af grundmasse ilmenit i det sydlige Vestgrønland. Ilmenit fra Maniitsoq (blå) er generelt M-rig med to populationer, en mellem 15 og 25 vægt % MgO og en omkring 12 vægt % MgO. Sidstnævnte er fra Goff lokaliteten op mod Sarfartoq regionen. Sammensætninger med meget lavere MgO-indhold er randsammensætninger. Ilmenit fra Sarfartoq regionen varier som i Maniitsoq regionen, men når ikke højere end ca. 15 vægt % MgO, og Sisimiut regionen tenderer mod lavere MgO (Nielsen *et al.*, 2009).

Phlogopit

Phlogopit forekommer kun i små mængder i grundmassen i kimberlittiske bjergarter fra Maniitsoq regionen (Fig. 11b), ofte som omkring 100 µm små, farveløse eller svagt farvede og velkrystalliserede klare korn. De er aluminium-rige og fattige på jern og titan og så har randene ofte berigelse i barium. Som det ses i diagrammet har de med >13 vægt % Al₂O₂ og mindre end 5 vægt % FeO (alt Fe som FeO) en sammensætning, der indikerer at de stammer fra kimberlitter (s.s.) (Mitchell 1995, Tappe et al. 2005, fig. 24). Kontrasten er stor til Sarfartog og især til Sisimiut. Grundmasse-phlogopit bliver mere og mere almindelig i grundmasserne i kimberlittiske bjergarter fra Sarfartoq- og i særdeleshed fra Sisimiut regionen. Variationen i kornstørrelse øges, og kornene bliver generelt større, mere brunfarvede og har karakteristisk røde til strågule pleokroitiske rande. Sammensætningsmæssigt bliver kerner af phlogopitkorn mere og mere jern- og titan-rige og fattige i aluminium. Randene består af tetraferriphlogopit, en varietet hvor al alumunium er erstattet af trivalent jern. Barium har randene ikke, hvilket ikke undrer, da baryt er en almindelig grundmassefase i de kimberlittiske bjergarter fra Sarfartoq og Sisimiut.



Fig. 24: FeO versus Al_2O_3 i grundmasse-phlogopit i det sydlige Vestgrønland. Diagrammet viser to populationer fra Maniitsoq regionen (blå). Den største med >13 vægt % Al_2O_3 og <5 vægt % FeO er i overensstemmelse med sammensætningen af phlogopit i sensu strictu kimberlitters grundmasse. Den anden population er fra Goff lokaliteten op mod Sarfartoq regionen. Grundmasse-phlogopit fra Sarfartoq regionen (grøn) viser faldende Al_2O_3 og stigende FeO, og falder uden for sammensætningsfeltet for kimberlit s.s. og har rande af Al-fri og meget Fe-rig tetraferriphlogopit. Udviklingen videreføres i grundmasse-phlogopit fra Sisimiut (solgul). (Nielsen *et al.*, 2009).

Kimberlit og aillikit i det sydlige Vestgrønland

Som nævnt ovenfor fandt Mitchell et al. (1999) klinopyroxen i mange af de kimberlittiske prøver, de undersøgte. Deres prøvesamling er domineret af materiale fra lokaliteter i Sarfartoq og Sisimiut regionerne, og i overensstemmelse med den herværende undersøgelse er klinopyroxen fundet i varierende mængder i stort set alle forekomster i samme regioner. Når der dertil lægges, at grundmasse-spinel og ilmenit fra samme regioner er relativt lave i magnesium, og at grundmasse-phlogopit er zoneret til tetraferriphlogopit uden bariumberigelse, er konklusionen klar. De kimberlittiske bjergarter fra Sarfartoq og Sisimiut regionerne er ikke kimberlitter (s.s.), men må klassificeres som aillikitter, og hvis de har højt klinopyroxenindhold som mela-aillikitter. Resultaterne er publiceret i Nielsen et al. (2009) og vist i figur 24 og understøtter konklusionen i Mitchell et al. (1999), men støtter ikke en afvisning af forekomst af kimberlit (s.s.) i Grønland.

Som vist i de mineralkemiske diagrammer (Fig. 22-24) opfylder grundmasse-spinel, -ilmenit og -phlogopit fra Maniitsoq regionen de af Tappe *et al.* (2005) opstillede kriterier for kimberlit (s.s.) (se fig. 20). Lagt dertil at klinopyroxen ikke forekommer eller er meget sjælden i prøver fra Maniitsoqregionen, er konklusionen klar: De kimberlittiske bjergarter i Maniitsog regionen er kimberlit (s.s.) (Nielsen og Sand, 2008, Nielsen et al. 2009). Et væsentligt mål for undersøgelsen igangsat af GEUS og Råstofdirektoratet er dermed opfyldt. Grønland har forekomst af kimberlit (s.s.), og de kan sammenlignes med klassiske kimberlitforekomster i Sydafrika (Nielsen et al., 2006). En international anerkendelse af denne konklusion gives i Kjaersgaard et al. (2009), der ser Maniitsoq forekomsten i Majuagaa-gangen som et typeeksempel på karbonatrig kimberlit.

At Mitchell *et al.* (1999) ikke nåede til denne konklusion, har en forklaring. Mitchell *et al.* havde kun meget få prøver fra Maniitsoq regionen og dermed ikke et tilstrækkeligt statistisk grundlagt for at se de regionale forskelle i den kimberlittiske aktivitet. I deres analytiske data er sammensætninger som de her beskrevne rapporteret, og med et større materiale ville de antageligvis også have konkluderet at kimberlit (s.s.) findes i Maniitsoq regionen.

Betydningen af de regionale variationer

Phlogopit er det grundmassemineral, der er bedst egnet til regionale sammenligninger. Phlogopit findes i alle regioner og udviser klare forskelle i sammensætning. På vestsiden af Davis Strædet, på den canadiske østkyst, forekommer mange kimberlittiske bjergarter (Tappe *et al.*, 2006, 2007, 2008, 2011). Inkluderes analyser af phlogopit fra den canadiske side, ses et klart mønster (Fig. 25). Phlogopit udvikler sig systematisk fra jern- og titan-fattig og aluminium-rig kimberlitisk phlogopit i Maniitsoq regionen mod mere og mere jern- og titan-rige sammensætninger med tetraphlogopit rande i Sisimiut regionen og på den canadiske side. Bjergarternes grundmasse har også stigende indhold af phlogopit og samtidig hermed et fald i indhold af kalkspat og dolomit. Phlogopit er et vandholdigt mineral, og selv om det oprindelige indhold af vand i kimberlittiske smelter ofte vanskeligt lader sig bestemme på grund af senere omdannelse, er den regionale udvikling fra Maniitsoq til det østlige Canada tilsyneladende udtryk for en systematisk udvikling fra relativet CO₂-rige til relativt H₂O-rige smelter.

At der ikke er tale om en effekt som følge af senere omdannelse kan underbygges af analyser af bjergartsprøverne (se appendix til Nielsen et al., 2009). Knuses og analyseres en kimberlitprøve fås en analyse der indeholder alle komponenter i bjergarten, det vil sige, grundmasse, mikrokryster, mega- og makrokryster og små nodulfragmenter. Man kan prøve at undgå så meget xenokrystisk og xenolitisk materiale som mulig, men man vil aldrig kunne få en ren prøve af en kimberlittisk bjergarts grundmasse. Ikke desto mindre bruges bjergarters kemiske sammensætning (bulk analyse) udbredt i faglitteraturen, fordi det med behørige forbehold ofte giver god mening. Den altovervejende del af iblandet materiale er det relativt simple mineral olivin og bjergartssammensætninger er udsat for en forskydning bestemt af andelen af iblandet olivin. Med andre ord kan bulk analyser benyttes til sammenligninger og udredning af udviklingstendenser med behørig iagttagelse af effekten af iblandet xenokrystisk olivin.

Eksperimentelle smelteforsøg på sammensætninger svarende til jordens kappe med lidt tilsat CO, giver indblik i, hvilke typer af smelte kappen kan give ophav til, og under hvilke betingelser specifikke smeltetyper dannes. Gudfinnsson & Presnal (2005) og senere Brey et al. (2008) rapporterer en række forsøg på opsmeltning af kappe sammensætninger med tilførsel af H₂O og CO₂ i varierende forhold ved lave grader af opsmeltning. Resultatet af undersøgelsen i Gudfinnsson og Presnal (2005) vises blandt andet i diagrammet i Fig. 26. Her ses, at de CO₂-rige forsøg resulterer i højere SiO_2/Al_2O_2 (på grund af meget lavt Al_2O_2) og lavere MgO/CaO forhold i smelter dannet under forsøg med højere H₂O indhold. I diagrammet er også vist variationen i bulk sammensætninger af alle analyserede bjergarter fra det sydlige Vestgrønland til det østlige Canada (Nielsen et al., 2009, se appendix). Tages behørigt forbehold for effekten af varierende olivin-indhold (SV-NØ variation i diagrammet) og eventuel kontamination fra grundfjeldet, ses en klar tendens. Bulk sammensætninger fra Maniitsogregionen ligger til højre i diagrammet og sammensætningerne fra det østlige Canada til venstre i diagrammet, svarende til stigende H₂O/CO₂ forhold fra Maniitsoq til østlige Canada, ganske som set i variationen i sammensætningen af phlogopit. Fordelingen i diagrammet viser, at den observerede variation i phlogopit-sammensætninger er en afspejling af de mineralogiske og kemiske varia-



Fig. 25: Variation i TiO₂ versus Al_2O_3 i phlogopit-sammensætninger fra Maniitsoq i syd (blå) over Sarfartoq (grøn) og Sisimiut (solgul) til Torngat regionen (vist som felt), østlige Canada (data fra Tappe *et al.*, 2004). Den systematiske udvikling væk fra feltet for sammensætninger typiske for kimberlit s.s. (kasse ø.tv.) er åbenlys (Nielsen *et al.*, 2006).

tioner i kappen i kildeområdet for de kimberlittiske smelter. I bund og grund er variationerne udtryk for stigende iblanding af phlogopit-rigt materiale og vand til, og reaktion med, en karbonatrig smelte, der bedst er eksemplificeres af smelten i kimberlittiske forekomster i Maniitsoqregionen, f. eks. Majuagaa gangen (Fig. 5, se Nielsen & Sand 2008, Nielsen *et al.*, 2009, Tappe *et al*, 2011).

Hvad skyldes variationen? Kimberlittiske bjergarter indeholder mange forskellige noduler og en særlig, men mere ualmindelig type tiltrækker sig opmærksomhed. Den har et højt indhold af phlogopit, og bjergarten kaldes glimmerit (Fig.9c). De findes såvidt det vides ikke i Maniitsoq området, men bliver mere og mere almindelige igennem Sarfartoq og Sisimiut regionerne til det østlige Canada. Det er nærliggende at antage, at glimmerit bliver en mere og mere almindelig del af den lithosfæriske kappe fra Maniitsoq regionen til det østlige Canada. Med andre ord, mængden af phlogopit og sammensætningen af phlogopit i smelter fra den lithosfæriske kappe afspejler regionale variationer i mineralogien i den lithosfæriske kappe.

Maniitsoq regionen ligger i Grønlands gamle arkæiske grundfjeld med bjergarter, der er mere end 2500 millioner år gamle (Henriksen, 2005). Sisimiut-regionen og det østlige Canada ligger i områder påvirket af senere bjergkæde-dannelse med aldre på omkring 1800 Ma. Sarfartoq regionen ligger nærmere overgangszonen mellem det gamle og det yngre grundfjeld. Det er nærliggende at antage, at variationen set i de kimber-



Fig. 26: Sammensætningen af eksperimentelle smelter i forsøg med karbonatiseret kappe-peridotit (efter Gudfinnsson & Presnall, 2005). Diagrammet viser variation i sammensætninger som følge af ændringer i tryk og sammensætning af volatiler i eksperimenterne. I diagrammet er også vis tsammensætningerne for kimberlittiske forekomster fra Maniitsoq (blå) over Sarfartoq (grøn) og Sisimiut (solgul) til Torngat, Canada (lilla). Se teksten for nærmere forklaring (Nielsen *et al.*, 2009).

littiske bjergarters grundmasse-mineralogi og nodulselskab er en afspejling af den geologiske udvikling i de forskellige dele af den grønlandske lithosfære. Phlogopit i den lithosfæriske kappe er resultatet af reaktion mellem kappen og tilført vand, m.m., og der er muligt at der under den ca. 1800 Ma gamle bjergkædefoldning nord og vest for den arkæiske kerne i Grønland et tilført vand, m.m. til den lithosfæriske kappe. Det ville have medført mere eller mindre udbredt dannelse af phlogopit der senere ville reagere med i de kimberlittiske smelter på deres vej op gennem den lithosfæriske kappe. En anden mulighed er reaktion med meget phlogopitrige bjergarter fra en i Sisimiut regionen udbredt lamproittisk magmatisme (Scott, 1981; Thy et al., 1987). Den lamproittiske aktivitet er ca. 1280 Ma gammel (Secher et al, 2009) og kunne ligeledes være resultatet af en tidligere vandberigelse og phlogopitdannelse i den lithosfæridske kappe i tilknytningen til udviklingen i den grønlanske lithosfære tilbage til for 1800 millioner år siden (se diskussioner i Nielsen et al, 2009 og Steenfeldt et al., 2009). Der er indtil videre ingen endelig løsning på sammenhængene, men den regionale variation er klar, og mest markant er det regional fald i CO₂/H₂O forholdet fra Maniitsoq over Sarfartoq til Sisimiut og det østlige Canada.

Maniitsoq regionen: Majuagaa kimberlittens smelte

At Maniitsoq regionens kimberlittype skulle være mindst påvirket af reaktion med phlogopit-rigt kappemateriale åbner mulighed for beregning af den oprindelige smeltesammensætning i Maniitsoq regionen. Maniitsoq kimberlit har en relativt simpel mineralogi og med en vurdering af indholdet af xenokrystisk materiale og den kemiske sammensætningen af dette skulle en beregning af den oprindelige (primære) kimberlitsmelte fra dybt i den lithosfæriske kappe være mulig. Forudsætningen er en relativt sikker bestemmelse af, hvad og hvor meget der er blandet ind i den primære karbonatitiske smelte i kildeområdet dybt i kappen og på dens vej til den øvre jordskorpe. Majuagga gangen ca, 50 km SØ for Maniitsoq er en velkendt kimberlit gang, et par meter bred og med en længde på mindst 2.5 km (fig. 21, Jensen *et* al., 2004b). Gangens bjergarter er friske, stort set fri for omdannelse, velblottede og diamantbærende (Table 1). Under indsamlingen til omtalte diamanttest samledes også et stort antal enkeltprøver til petrologiske og geokemiske studier (Nielsen og Sand, 2008). Prøverne er benyttet til modellering af sammensætningen af Majuagaa gangen smelte.

Det væsentligste problem for beregning af den

primære smelte er at finde generelt accepterede kriterier for identifikation af: (1) olivin krystalliseret fra gangens smelte og (2) iblandet lithosfærisk olivin. Olivin forekommer i noduler, som mega- og makrokryster, mikrokryster, fenocryster og som olivin-mel - hvor meget af det er krystalliseret fra smelten? Alle olivintyper er analyseret med elektron mikrosonde (mineral analyser i punkter ned til ca. 10 kubik mikrometer = μ m³) og særlig opmærksomhed blev vist små velkrystalliserede korn samt de få µm-brede rande på mange olivin korn (Fig. 27). Diagrammet viser at noduler, mega- og makrokryster og olivinmel, samt veldefinerede kerner i velkrystalliserede fenokryster falder i et bredt bånd fra højt forsterit (Mg-rig) og højt nikkel (Ni) til lavere forsterit og lavere Ni. Det er et helt normalt billede for sammensætningen af olivin. Helt anderledes er rand-sammensætningerne. Rande knyttet til samltlige morfologiske olivintyper viser

Tabel 1: Resultat af diamanttest på Majuagaa gangen, Maniitsoq. Diamanterne er ganske vist små, men med mulighed for fund af større diamanter. Detaljer kan findes i Jensen *et al.* (2004b).

Delprøve	Vægt i kg	Antal diamantkorn i størrelses interval (μm)					Samlet antal diamantkorn	Samlet vægt i mg	Samlet vægt i karat
		600-	425-	300-	212-	150-			
		425	300	212	150	100			
1	184.5	3	2	2	11	19	37	1.284	0.006
2	164.9	0	1	4	5	5	15	0.328	0.002
3	105.5	0	1	1	3	4	9	0.181	0.001
4	98.1	0	1	1	3	7	12	0.158	0.001
5	185.4	0	2	2	5	8	17	0.293	0.001
6	182.5	2	2	1	7	9	21	0.793	0.004
7	163.5	0	0	3	5	6	14	0.183	0.001
Sub-total	1084.4	5	9	14	39	58	125	3.220	0.016



Fig. 27: Sammensætningen af olivin i Majuagaa kimberlit. Alle morfologiske typer af olivin er analyseret og viser en normal variation fra højt forsterit (Fo) og højt nikkel (Ni) til lavere forsterit og lavere nikkel, bortset fra rande på alle morfologiske typer. Randene varierer næsten ikke i forsterit indhold, men fra ca. 2000 til 500 ppm nikkel og er krystalliseret fra forekomstens smelte. Al anden olivin er iblandet xenokrystisk materiale fra den lithosfæriske kappe (nærmere forklaring i teksten og detaljer i Nielsen & Jensen, 2005 og Nielsen & Sand, 2008).

meget ringe variation i forsterit indhold (ca. 88.5% Fo), men en Ni-variation fra ca. 2000 til ca. 500 ppm (parts per million). Randene er helt klart krystalliseret fra smelten i gangen. Randene udgør kun en mindre del af al olivin i gangen og det betyder at langt hovedparten af olivin er xenokrystisk og tilført smelten. Udover olivin er Majuagaa gangen også karakteriseret af ilmenit megakryster (Fig. 8b). Er de krystalliseret fra smelten i gangen eller er de xenokrystisk materiale? Som det ses i figur 28 har grundmasse-ilmenit og megakrysterne ikke den samme kemiske sammensætning. Grundmasse ilmenit er langt rigere i magnesium. Det er derfor ikke sandsynligt at megakryst og grundmasse-ilmenit har samme oprindelse og megakrysterne kan ikke antages krystalliseret fra smelten i gangen. Udover grundmassen, olivin og ilmenit er der kun et mindre indhold af orthopyroxen, der er under opløsning, da orthopyroxen ikke er stabil i karbonatrige smelter ved lavt tryk.

Smelten i Majuagaa gangen kan nu beregnes. Fra bulk sammensætningen, bestemt som et gennemsnit af sammensætninger fra mange prøver (Tabel 2, Nielsen *et al*, 2009 med appendix), skal fratrækkes en andel olivin og en andel ilmenit, men hvor meget skal trækkes fra? Det er lidt et gæt, men uanset hvad, vil smeltens



Fig. 28: Sammensætningen af ilmenit i Majuagaa gangen. Ilmenit forekommer dels som grundmassemineral og dels i makrokryster. Grundmasse-ilmenit har med få undtagelser mellem 20 og 25 vægt % MgO, hvorimod makrokryst ilmenit har sammensætninger på 10-12 vægt % MgO, med mere MgO-rige rande trækkende over mod grundmasse-ilmenits sammensætning. Sammensætningen af ilmenit makrokryster fra Premier Pipe i Kimberley, Sydafrika ligger inden for P-feltet. Den stiplede opdeling viser sammenhængen mellem sammensætningen af ilmenit og reaktion mellem diamant og forekomsters smelte. Bedst bevaret, men med risiko for ny og ødelæggende vækst, er diamanter i smelte med sammensætninger som i Maniitsoq fulgt af ringere og ringere bevaring i smelter i Sarfartoq og Sisimiut forekomster (Nielsen & Jensen, 2005).

sammensætning nærme sig en karbonatitisk sammensætning med lavere SiO₂-indhold (karbonatitsmelte er helt domineret af CaO, MgO og CO₂). Kendte kappe karbonatitter har lavt Ni indhold og det kan bruges til beregning af den mængde olivin, der skal fratækkes, da Ni stort set kun er indeholdt i olivin. Ni indholdet i en kappe karbonatit er sat til ca. 200 ppm. Gennemsnitssammensætningen for olivin, der antages iblandet, er beregnet til 2525 ppm (gennemsnit af ca. 500 analyser) og med udgangspunkt i en bulk sammensætning med 1064 ppm Ni beregnes et indhold på 37 vægt % xenokrystisk (iblandet) olivin (se detaljer i Nielsen & Sand, 2008). Mængden af xenocrystisk ilmenit er derimod visuelt vurderet og som et minimum sat til 1 vol %. Den beregnede smelte sammensætning har 17 vægt % SiO₂, svarende til en TiO2-rig "silicokarbonatit". Et andet estimat antager 33 % xenocrystisk olivin (visuelt estimat) og et antaget TiO, indhold på 0.2 vægt % i kappederiveret karbonatit. Den alternative beregning giver en smelte der er noget højere i SiO₂ (ca. 20.5 vægt %). Beregningerne er i udgangspunkt ret forskellige, men giver i begge tilfælde karbonatittiske smelter med et noget usikkert SiO₂ indhold mellem ca. 17.5 og 20.5 vægt %, hvoraf en andel kan stamme fra orthopyroxen under opløsning. SiO₂ indholdet er derfor sandsynligvis overvurderet og smelten endnu mere karbonatittisk i karakter. Den gennemsnitlige bjergartssammensætning, de to modelsmelter, og flere klassiske kimberlittiske sammensætning er vis i Tabel 2.

Den beregnede sammensætning for smelten i Majuagaa gangen er karbonatitisk og ikke en volatilrig silikatsmelte som almindeligvis antaget for kimberlitter (Becker og LeRoux, 2006, Mitchell, 1986). Beregningen er behæftet med en del usikkerhed, da vurderingen af proportionerne, der skal fratrækkes totalsammensætningen, er noget usikre, men det rokker ikke ved konklusionen: Uanset hvad er Majuagaa gangens smelte karbonatitisk. Konklusionen er kontroversiel selv om flere og flere forudsætter en karbonatittisk smelte i kimberlittiske forekomster. Men, som diskuteret nedenfor, åbner muligheden for en karbonatitisk primærsmelt for kimberlittiske forekomster for diskusion af mange uafklarede spørgsmål vedrørende kimberlittiske smelters sammensætning, deres dynamik, og forekomsternes diamantpotentiale.

Implikationer for kimberlittiske bjergarter

Regionale og globale implikationer

Tappe *et al.* (2011) diskuterer oprindelse af aillikitter med aldre på 600-550 Ma i områderne omkring Davis Strædet på grundlag af mineralkemi, bjergartskemi, og bjergarts isotop- og sporelementsammensætninger. Konklusionen er at aillikitter, mela-aillikitter og alle bjergarter i den behandlede suite repræsenterer en karbonat-rig smelte iblandet større eller mindre komponenter fra den lithosfæriske kappe, dels ved reaktion, og dels ved mekanisk iblanding. Smelter kan derefter være mere eller mindre udviklet fra den oprindelige blandede sammensætning (Tappe *et al.*, 2011). Konklusionen svarer ret nøje til konklusionen i Nielsen og Jensen (2005) og Nielsen og Sand (2008), og det antyder at hele området omkring Davis Strædet har en mere eller mindre fælles karbonatittisk grundkomponent og at de fleste andre variationer kan tilskrives større eller mindre iblanding og reaktion med lithosfærisk kappe materiale.

Tabel 2: Gennemsnitssammensætning for Majuagaa gangen, beregning af smelten i forekomsten og andre kimberlittiske sammen	n-
sætninger til sammenligning. Gennemsnitsammensætningen i venstre kolonne skal sammenlignes med de sidste 4 kolonner.	

			Majuagaa ga	Til sammenligning					
	Gen- nem- snit af bulk prøver	Gennem- snits sammen- sætning af xeno- krystisk olivin	Gennem- snits sammen- sætning af xeno- krystisk ilmenit	Beregnet sammen- sætning af Maju- agaa Smelte, model 1	Beregnet sammen- sætning af Maju- agaa Smelte, model 2	Gennem- snit for fin- kornede prøver fra Wessel- ton, Syd- afrika	Gennem- snit for mega- kryst- rige prø- ver fra Wesselton, Sydafrika	Gen- nem- snit for Jerico Kim- berlit, Canada	Gen- nemsnit for kim- belit Sensu stricto Syd- afrika
#	19					7	17	4	44
kilde	1	1	1	1	2	3	3	4	5
Olivin proportion				0.37					
Ilmenit proportion				0.01					
Smelte proportion				0.62					
Kemisk sammer	nsætning,	vægt %							
SiO ₂	25.84	40.56	0.02	17.47	20.48	24.46	31.55	27.75	30.26
TiO ₂	3.62	0.02	52.16	4.99	0.19	3.11	2.00	1.50	1.91
Al ₂ O ₃	1.42	0.01	0.61	2.27	2.33	3.58	2.57	1.87	2.87
Cr ₂ O ₃	0.19	0.04	0.38	0.28	id	0.29	0.19	0.35	0.22
Fe ₂ O ₃	3.78	id	7.66	5.97	6.33	9.74	9.01	id	8.63
FeO	6.92	9.19	27.33	5.24	3.92	id	id	7.06	void
MnO	0.19	0.11	0.3	0.24	0.20	0.19	0.15	0.17	0.16
NiO	0.13	0.32	nd	0.02	0.02	0.09	0.16	id	0.14
MgO	33.36	49.67	11.49	23.98	25.67	25.94	31.30	27.23	29.62
CaO	10.72	0.04	0.01	17.27	17.96	15.07	8.14	13.36	10.13
Na ₂ O	0.09	0.03	0.04	0.13	0.16	0.26	0.35	0.10	0.39
K ₂ O	0.20	0.01	0	0.32	0.33	0.68	1.29	1.48	1.31
P ₂ O ₅	0.50	id	id	0.81	0.83	1.74	1.00	0.68	1.48
BaO	0.10	id	id	0.16	id	0.18	0.13	id	id
Volatiler	12.93	id	id	20.85	21.63	14.48	11.97	18.43	12.88
FeOt	10.32	9.19	34.22	10.61	9.32	8.76	8.11	7.06	7.77

Id: ingen data

1: Nielsen & Sand (2008)

2: Nielsen & Jensen (2005)

3: Edgar et al. (1988) efter Shee (1986)

4: Kopylova et al. (2007)

5: Gennemsnit af 44 prøver fra Wesselton, DeBeers, Benfontein and Dutoitspan forekomsterne (Edgar et al., 1988 og Shee, 1986).

I diskussioner om kimberlitters oprindelse og sammensætning har sydafrikanske forekomster indtil for få år siden spillet en helt afgørende rolle som typeeksempler. De var eksemplerne på hvordan kimberlitter skulle se ud. Siden har et veritabelt diamant-boom i Canada medført, at canadiske forekomster blev foreslået som type-eksempler (fig. 5). I bund og grund er det ikke en farbar vej at gå. Med iblanding af den til ethvert kontinentalområde hørende lithosfæriske kappe vil alle kimberlitter afspejle sammensætningen af den lithosfæriske kappe i et givent kontinent. Der vil være en canadisk type præget af lettere beriget lithosfære (Kjaergaard et al., 2009), en sydafrikansk type (orangeite eller type II kimberlit) præget af reaktion med MARID (Mica-Amphibole-Rutile-/llmenite-Diopside) kappe sammensætninger (Becker & Le Roux, 2006, Mitchel 1995), en grønlandsk type (Maniitsoq) uden megen overprægning (Nielsen & Sand, 2008, Nielsen et al, 2009) og så videre. Kun når man kender den primære karbonatitiske(?) smeltes sammensætning for rigtig mange kimberlittiske forekomster i flere kontinental områder kan man begynde at identificere universelle typer af kimberlitsmelte.

Implikationer for diamantprospektivitet

Med sammensætningsvariationerne i de kimberlittiske bjergarter og i kappen under Vestgrønland rejser spørgsmålet sig: Har den regionale variation betydning for prospektiviteten for diamant? Spørgsmålet er mere omfattende end som så. Først må man se på de noduler og indikator-mineraler, der forekommer i de tre området. Og ja, der er noduler og indikatormineral-sammensætninger, i alt fald i Maniitsoq og Sarfartog regionerne, der viser en dybde på den lithosfæriske kappe på over 150 km for 600-550 millioner år siden (Steenfelt et al., 2009 a,b, Sand et al., 2009). Data fra Sisimiut området er ikke fyldestgørende, men de rigtige nodultyper er fundet (Scott, 1981), og melaaillikitgange fra den canadiske side af Davis Stræde har vist sig at være diamantførende (Tappe et al. 2008). Der er derfor intet til hinder for, at diamanter kan findes i alle de tre grønlandske regioner.

Det næste spørgsmål er så om diamanter har større eller mindre chance for at overleve i smeltetyperne i kimberlit- og aillikitforekomsterne i de tre regioner. Naturlige diamanter viser meget ofte tegn på overfladeopløsning, som resultat af reaktion med den smelte de transporteres i. Mange undersøgelser belyser reaktionerne (f. eks., Khokhryakov og Pal'yanov, 2010), men der tegner sig ikke et klart billede. I karbonatitiske såvel som silikatsmelter kan opløsning ses, men måske vigtigst for reaktionen er højt H_2O/CO_2 forhold. Set i det lys og sammenholdt med empiriske indikation relateret til ilmenit sammensætningen (fig.23, Gurney og Zweistra, 1995), er det forventeligt, at diamant i stigende grad vil blive udsat for opløsning med stigende phlogopit-indhold og faldende Mgindhold i ilmenit, og altså fra Maniitsoq, over Sarfartoq til Sisimiut. Til gengæld ville der være risiko for vækst af ny diamant i Maniitsoq områdets forekomster, en vækst der kan være skadelig for transporterede diamanter. På nuværende tidspunkt er betydningen af forskellige smeltetyper for graden af reaktion mellem diamant og smelte derfor ikke åbenlys og må afvente et klarere og mere generelt billede af de sammensætningsmæssige variationer i smelter fra kimberlittiske bjergarter.

Andre implikationer

I beskrivelsen af de kimberlittiske gange bemærkedes ingen klare tegn på eksplosiv aktivitet og tilsyneladende ringe reaktion med sidesten, selvom stigende indhold af karbonat ses i sidestenen i forbindelse med Garnet Lake forekomsten (K. Hanghøj, personlig meddelelse, 2011). Med en karbonatitisk smeltesammensætning må antages en relativ lav smeltetemperatur, der ikke ville kunne medføre større grad af rekrystallisation eller opsmeltning af gangenes sidesten. En silikatsmelte med et væsentligt højere SiO₂ og MgO indhold og derfor højere olivinindhold som komponent i smelten, ville have en væsentlig højere smeltetemperatur med øget mulighed for reaktion med sidestenen til følge.

En anden mulig konsekvens af et skifte fra en volatilbærende silikatsmelte til en silikatbærende karbonatitisk smelte er kimberlittiske intrusioners dynamik. Grundmassen i Majuagaagangen indeholder store mængder af olivinmel. Det fintfordelte olivin er opslemmet i gangens relativt kolde Mg-rige karbonatitiske smelte. Kombinationen af lavere temperatur og indholdet af olivinmel vil alt andet lige betyde større viskositet og større densitet, faktorer der begge vil øge smeltens evne til at transportere noduler. Når en volatilbærende silikatsmelte forudsættes, giver en beregning af kimberlittiske smelters opstigen meget høje hastigheder, i størrelsesordenen 20m/sekund ~72 km/t). Hastigheden beregnes ud fra smeltens densitet, dens viskositet, og tyngde og størrelsen af de noduler, den har taget med op. Med en mulig ændring i densitet såvel som viskositet ændres beregningsgrundlaget grundlæggende for samme nodul størrelse og hastigheder på ned til 2-4m/sekund eller derunder er sandsynlige, altså måske en faktor 10 lavere end hidtil antaget (L. Pilbeam, personlig.meddelelse 2011). Men uden meget mere sikker information om kimberlittiske smelters kemiske sammensætning fra mange forekomster og detaljeret information om deres last af iblandet materiale er det på nuværende tidspunkt ikke

muligt at gennemføre en mere generel revurdering af opstigningshastigheder for kimberlittisk magma

En sidste og meget spekulativ konsekvens af en karbonatitisk primærsmelte for kimberlittiske bjergarter er at karbonatit, der kan antages at repræsente karbonatitsmelte mere eller mindre direkte fra kappen, kunne være diamantførende. Forfatteren er ikke bekendt med undersøgelser af karbonatitiske bjergarter, hvor forekomst af diamant er veldokumenteret. Dog kendes en rapport om en karbonati intrusion i Chagatai, Uzbekistan (More et al., 2009), i hvilken diamanter skulle være fundet og Shumilova (2008) rapporterer fund af diamanter i karbonatit fra Fuerteventura. Sarfartoq karbonatitintrusionen, der er samtidig med kimberlit og aillikit aktiviteten i sydlige Vestgrønland (Secher og Larsen, 1980 Secher et al, 2009), består af karbonatit med et varierende indhold af dolomit. Dolomit-bærende karbonatit er som udgangspunkt en mulig kappederiveret karbonatit. Det er svært at forestille sig en karbonatitforekomst, der ville være bedre egnet for en undersøgelse af den mulige forekomst af diamant i kappederiveret karbonatit.

Afsluttende bemærkninger

Grønland har nu veldokumenterede diamantførende kimberlitforekomster, der i type kan sammenlignes med kimberlit i klassiske diamantprovinser. Ingen af forekomsterne er i dag lønsomme, men de er stadig et rimeligt mål for efterforskning. De private selskabers intensive efterforskningsaktivitet medførte i Grønland og i Danmark offentligt behov for et bedre overblik over de diamantbærende værtsbjergarters forekomst i Grønland og en bedre forståelse af de diamantbærende bjergarters oprindelse. De af GEUS og Råstofdirektoratet igangsatte undersøgelser har ikke kun givet mere basal viden om de Grønlandske forekomster, men den opfølgende bearbejdning har også resulteret i ny grundlæggende viden og forståelse af kimberlittiske bjergarters oprindelse. Som sådan er undersøgelserne et eksempel på et vellykket samspil mellem den private efterforskningsindustris behov for information, offentlige interesser og grundvidenskabelig forskning.

Taksigelser

De diamantrelaterede undersøgelser i GEUS blev gennemført i årende 1999-2009 i et tæt og konstruktivt samarbejde med Råstofdirektoratet, Grønlands Hjemmestyre. I undersøgelserne har deltaget en lang række medarbejdere ved GEUS. Forfatteren er Leif Thorning, Agnete Steenfelt, Karsten Secher, Karina K, Sand, Lotte M. Larsen, Svend M. Jensen, Frands Schjøth en særlig tak skyldig. Derudover har projektet nydt godt af internationalt samarbejde og interesse repræsenteret af bl.a. Sebastian Tappe (Westfälisches Wilhelms-Universität, Tyskland), Vladimir Kamenetsky (University of Tasmania, Australien), Roger Mitchell (Lakehead University, Canada), Ilya veksler (GFZ Potsdam, Tyskland) og Graham Pearson (Durham, University, England). S. V. Funder og K. H. Kjær takkes for mange forbedringer i manuskriptet, Eva Metskens, Agnet Steenfelt og Karsten Secher takkes for illustrationer.

Litteraturhenvisninger

- Andrews, J.R. & Emeleus, C.H.,1971: Preliminary account of kimberlite intrusions from the Frederikshåb district, South-West Greenland. Geological Survey of Greenland Report 31, 1–26.
- Becker, M. & Le Roex, A.P. 2006: Geochemistry of South African on- and off-craton, Group I and Group II kimberlites: Petrogenesis and source evolution. Journal of Petrology 47, 673–703.
- Brey, G.P., Bulatov, V.K, Girnis, A.V. & Lahaye, Y. 2008: Experimental melting of carbonated peridotite at 6–10 GPa. Journal of Petrology 49, 797 – 821.
- Edgar, A.D., Amira, M., Baldwin, D.K., Bell, D.R., Shee, S.R., Skinner, E.M.W. & Walker, E.C. 1988: Highpressure-high-temperature melting experiments on a SiO2-poor aphanitic kimberlite from the Wesselton mine, Kimberley, South Africa. American Mineralogist 73, 542–533.
- Goff, S.P. 1973: The mineralogy and geochemistry of a kimberlite dyke from Søndre Isortoq fjord, South-West Greenland, 104 pp. Unpublished M. Ph. Thesis, Leicester University.
- Grütter, H.S. 2009: Pyroxene xenecryst geotherm: Techniques and application. Lithos 112S, 1167–1178.
- Grütter, H.S. & Tuer, J. 2009: Constraint on deep mantle tenor of Sarfartoq-area kimberlites (Greenland), based on moderne thermobarometry of mantlederived xenocrysts. Lithos 112S, 124–129.
- Gudfinnsson, G.H. & Presnall, D.C. 2005: Continuous gradations among primary carbonatitic, kimberlitic, melilititic, basaltic, picritic and komatiitic melts in equilibrium with garnet lherzolite at 3-8 GPa Journal of Petrology 46, 1645–1659
- Gurney, J. & Zweistra, P. 1995: The interpretation of major element compositions of mantle minerals in diamond exploration. Journal of Geochemical Exploration 53, 293–310.
- Henriksen, N. 2005: Grønlands geologiske udvikling – fra urtid til nutid, 270 pp. København: Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse

- Hutchison, M.T. & Frei, D. 2009: Kimberlite and related rocks from Garnet Lake, West Greenland, including their mantle constituents, diamond occurrence, age and provenance. Lithos 112S, 318–333.
- Hutchison, M.T., Nielsen, L.J. & Bernstein, S. 2007: P-T history of kimberlite-hosted garnet lherzolites from South-West Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 13, 45–48.
- Jensen, S.M., Secher, K., Rasmussen, T.M., & Schjøth, F. 2004a: Diamond exploration data from West Greenland: 2004 update and revision. Geological Survey of Denmark and Greenland Report 2004/117, 90 pp and 1 DVD.
- Jensen, S.M., Secher, K. & Rasmussen, T.M. 2004b: Diamond content of three kimberlitic occurrences in southern West Greenland. Diamond identification results, field description and magnetic profiling. Geological Survey of Denmark and Greenland Report 2004/19, 41 pp.
- Khokhryakov, A.F. & Pal´yanov, Y.N. 2010: The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data. American Mineralogist 92, 909–917.
- Kjaergaard, B.A., Pearson, D.G., Tappe, S, Nowell, G.M. & Dowall, D.P. 2009: Geochemistry of hypabyssal kimberlites from Lac de Gras, Canada: Comparison to a global database and application to the parent magma problem. Lithos 112S, 236–248.
- Kopylova, M.G., Matssev, S. & Raudssep, M. 2007: Searching for parental kimberlite melt. Geochimica et Cosmochimica Acta 71, 3616–3629.
- Larsen, L.M. 1991: Occurrences of kimberlite, lamproite and ultramafic lamprophyres in Greenland. Geological Survey of Greenland, Open File Series 91/2, 36 pp.
- Larsen, L.M. & Rex, D.C. 1992: A review of the 2500 Ma span of alkaline-ultramafic, potassic and carbonatitic magmatism in West Greenland. Lithos 28, 367–402.
- Le Maitre, R. W. 2002: Igneous Rocks: a Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, 236 pp. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lenzen, G.1980: South Africa and the birth of a great industri, I: Legrand, J. (red.): Diamonds: Myths, Magic and Reality, 65–85. New York: Crown Publishing.
- Mitchell, R.H. 1986: Kimberlites: mineralogy, petrography, and petrology, 442 pp. New York: Plenum Press.
- Mitchell, R.H. 1995: Kimberlites, orangeites and related rocks, 410 pp. New York: Plenum Press.
- Mitchell, R.H., Scott-Smith, B.H. & Larsen, L.M. 1999: Mineralogy of ultramafic dikes from

- Sarfartôq, Sisimiut and Maniitsoq area, West Greenland. I: Gurney, J.J., Gurney J.L, Pascoe M.D. & Richardson, S.H. (red.): The Nixon Volume, Proceedings of the VIIth International Kimberlite Conference, 574–583. Cape Town: Red Roof Design.
- More, K.R., Wall, F., Divaev, F.K. & Savatenkov, V.M. 2009: Mingling of carbonatite and silicate magmas under turbulent flow conditions: Evidence from rock textures and mineral chemistry in sub-volcanic carbonatite dykes, Chatagai, Uzbekistan. Lithos 110, 65–82.
- Nielsen, T.F.D. & Jensen, S.M. 2005: The Majuagaa calcite-kimberlite dike, Maniitsoq, southern West Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Report 2005/43, 59 pp.
- Nielsen, T.F.D., Sand, K.K., 2008: The Majuagaa kimberlite dike, Maniitsoq region, West Greenland: constraints on an Mg-rich silicocarbonatitic melt composition from groundmass mineralogy and bulk compositions. The Canadian Mineralogist 46, 1043-1061.
- Nielsen, T.F.D., Jebens, M., Jensen, S.M. & Secher, K., 2006: Achetypal kimberlite from the Maniitsoq region, southern West Greenland and analogy to South Africa. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 10, 45–48.
- Nielsen, T.F.D, Jensen, S.M., Secher; K. Sand, K.K. 2009: Kimberlite and ailikite melts in the Diamond Province of southern West Greenland: a regional perspective. Lithos 112S, 358–371.
- Roberts, B.1976: Kimberley; Turbulent City, 424 pp. Cape Town: David Philip Publications.
- Sand, K.K. 2007: A geotherm for the cratonic lithospheric mantle in southern West Greenland: thermal implications for diamond potential, 124 pp., appendixes and DVD. Msc thesis, Geological Institute, University of Copenhagen, Denmark.
- Scott, B.H., 1981: Kimberlite and lamproite dikes from Holsteinsborg, West Greenland. Meddelelser om Grønland Geoscience 4, 24 pp.
- Secher, K. Heaman, L.M., Nielsen, T.F.D., Jensen, S.M., Schjøth, F. & Creaser, R.A. 2009: Timing of kimberlite, carbonatite, and ultramafic lamprophyre emplacement in the alkaline province located 64° – 67°N in southern West Greenland. Lithos 112S, 400–406.
- Secher, K. & Larsen, L.M. 1980: Geology and mineralogy of the Sarfartôq carbonatite complex, southern West Greenland. Lithos 13, 199–212.
- Shee, S.R. 1986: The petrogenesis of the Wesselton mine kimberlites, Kimberley, South Africa. Ph.D. thesis, University of Cape Town, Sydafrika.
- Shumilova, T. 2008: Diamonds in carbonatites of Fuerteventura island. Abstract 33. International Geological Confgress. Oslo, Noway.

- Steenfelt, A., Hollis, J.A. & Secher, K. 2006: The Tikiusaaq carbonatite: a new Mesozoic intrusive complex in southern West Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 10, 41–44.
- Steenfelt, A. Jensen, S.M. Nielsen, T.F.D. & Sand, K.K. 2009a: Regional distribution patterns of minerals and chemical components in surface media reflecting and characterising occurrences of ultramafic lamprophyre dykes, kimberlite dykes and carbonatite in WestGreenland. Lithos 112S, 116–123.
- Steenfelt, A. Jensen, S.M. Nielsen, T.F.D., Sand, K.K. & Secher, K. 2009b: Diamonds and lithospheric mantle properties in the Neoproterozoic igneous province of southern West Greenland. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 17, 65–68.
- Tappe, S., Jenner, G.A., Foley, S.F., Heaman, L., Besserer, D., Kjarsgaard, B.A. & Ryan, B. 2004: Torngat ultramafic lamprophyres and their relation to the North Atlantic alkaline province. Lithos 76, 491–518.
- Tappe, S., Jenner, G.A & Kjarsgaard, B.A., 2005: Integrating ultramafic lamprophyres into the IUGS classification of igneous rocks: rational and implications. Journal of Petrology 46, 1893-1900.
- Tappe, S., Foley, S.F., Jenner, G.A., Heaman, L.M., Kjarsgaard, B.A., Romer, R.L. Stracke, A.,
- Joyce, N. & Hoefs, J. 2006: Genesis of ultramafic lamprophyres and carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a consequence of incipient lithospheric thinning beneath the North Atlantic craton. Journal of Petrology 47, 1317–1343.
- Tappe S., Foley S. F., Stracke, A., Romer R. L., Kjarsgaard B. A., Heaman L. M. & Joyce N. 2007: Craton reactivation on the Labrador Sea margins: 40Ar/39Ar age and Sr–Nd–Hf–Pb isotope constraints from alkaline and carbonatite intrusives. Earth Planetary Science Letters 256, 433–454.
- Tappe, S., Foley, S.F., Kjarsgaard, B.A., Romer, R.L., Heaman, L.M., Stracke, A. & Jenner, G.A., 2008: Between carbonatite and lamproite—diamondiferous Torngat ultramafic lamprophyres formed by carbonate-fluxed melting of cratonic MARID-type metasomes. Geochimica et Cosmochimica Acta 72, 3258–3286.
- Tappe, S., Steenfelt, A., Heaman, L.M. & Simonetti, A. 2009: The newly discovered Jurassic Tikiusaaq carbonatite-aillikite occurrence, West Greenland, and some remarks on carbonatite-kimberlite relationships. Lithos 112S, 385–399.
- Tappe, S., Pearson, D.G., Nowell, G., Nielsen, T, Milstead, P. & Muelenbachs, K. 2011: A fresh isotopic look at Greenland kimberlites: Cratonic mantle lithosphere imprint on deep source signal. Earth and Planetary Science Letters, 305, 235–248.

- Thy, P., Stecher, O. & Korstgård, J.A., 1987: Mineral chemistry and crystallization sequences in kimberlite and lamproite dikes from the Sisimiut area, central West Greenland. Lithos 20, 391–417.
- Tukiainen, T. & Thorning, L. 2004: Detection of kimberlitic rocks in West Greenland using airborne hyperspectral data: the Hypergreen 2002 project. Geological Survey of Denmark and Greenland, Bulletin 7, 69–72
- Wilson, A.N. 1982: Diamonds from Birth to Eternity, 450 pp. Santa Monica: Gemological Institute of America.

Indhold:

Michael Houmark-Nielsen: Stevns halvøen og kvartærtidens isstrømme	1
Troels F.D. Nielsen: Diamantbærende kimberlit og aillikit i det sydlige Vestgrønland	12
Gunver Krarup Pedersen, Stig Schack Pedersen, Niels Bonde, Claus Heilmann-Clausen, Lotte Melchior Larsen, Bent Lindow, Henrik Madsen, Asger Ken Pedersen, Jes Rust, Bo Pagh Schultz, Michael Storey, Pi Suhr Willumsen: Molerområdets geologi - sedimenter, fossiler, askelag og glacialtektonik	41
Bestyrelsens beretning 2011	136