

DIE VREDEFORT STRUKTUR IN SÜDAFRIKA - EIN ÜBERBLICK ÜBER
ALTE UND NEUE FAKTEN UND HYPOTHESEN

von

W.U.Reimold ⁺⁾

Vortrag vor der österreichischen Mineralogischen Gesellschaft am 8. April 1991.

Zusammenfassung

Der Ursprung der Vredefort Kryptoexplosionsstruktur ist seit Jahrzehnten der Grund für oft heftig geführte Diskussion zwischen den Befürwortern der Impakt- und der Gasexplosions-Hypothesen gewesen. Vor einigen Jahren erlebte die geologische Untersuchung des Vredefort Domes einen erneuten Aufschwung, und weitere wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die strukturgeologischen Verhältnisse und die Geophysik dieses zentralen Bereichs des Witwatersrand Basins, auf Gesteinsdeformationen (Pseudotachylit, Mikrodeformationen in Quarz, "shatter cones") und Geochronologie wurden gewonnen. Dies hat auch dazu geführt, daß eine weitere genetische Hypothese, nämlich Bildung der Struktur als Folge rein tektonischer Prozesse, wieder aufgenommen wurde.

Dieser Beitrag stellt einen Versuch dar, ein Resume der Vor- und Nachteile der diversen Hypothesen zu präsentieren und die neueren Forschungserkenntnisse zusammenzustellen. Dabei wird deutlich, daß nach wie vor wesentliche Lücken in der Vredefort Datenbank gefüllt werden müssen, bevor eine universell akzeptable Theorie für den Ursprung des Vredefort Domes aufgestellt werden kann.

1. Einleitung

Die Vredefort Struktur (auch Dom oder Ring genannt), ca. 120 km südwestlich von Johannesburg im Herzen des wichtigsten südafrikanischen Bergbaugesbietes, des Witwatersrand Basins, gelegen, ist eine der wenigen großen terrestrischen Kryptoexplosionsstrukturen. Dieser Begriff bedeutet, daß eine solche Struktur zwar von eindeutig katastrophalem Ursprung ist, daß jedoch die Natur dieser Katastrophe noch debattiert wird. In Bezug auf den Vredefort Dom wurden seit Jahrzehnten zwei Bildungs-Hypothesen diskutiert: 1. Genese durch Impakt, und 2. Bildung durch eine

+) Dr. W. U. Reimold
Economic Geology Research Unit
at the Department of Geology
University of the Witwatersrand
P.O. Wits 2050
Johannesburg Republik of South Afrika

gigantische intern verursachte Gasexplosion. Die Impakt- und Explosions-Hypothesen begründeten sich im wesentlichen auf der Existenz von besonderen Deformations-Phänomenen in Vredefort Gesteinen: Große Volumina von Pseudotachylit-Brekzien, verbreitete Vorkommen von sogenannten "shatter cones" (Strahlenkegeln), Auftreten von planaren Mikrodeformationsstrukturen in Quarz und eine Beschreibung von Vorkommen der Quarz-Hochdruckmodifikationen Coesit und Stishovit in dünnen Pseudotachylitgängen. Von Zeit zu Zeit wurden auch rein tektonische Bildungsprozesse vorgeschlagen, wie zum Beispiel Überschiebungen, diapirische Dombildung, oder, wie in letzter Zeit, eine Kombination dieser beiden Prozesse mit Gleitbewegungen in Richtung auf den Dom entlang wichtiger schichtparalleler Störungszonen im nördlichen Teil des Witwatersrand Basins. Eine weitere, kürzlich vorgeschlagene Hypothese nimmt an, daß die Vredefort Struktur eine Impaktstruktur ist, die seit dem Ereignis stark tektonisch modifiziert wurde.

Die geologische Bedeutung der Vredefort Struktur begründet sich wie folgt:

1. Das kristalline Grundgebirge im Zentrum der Struktur scheint einen kompletten geologischen Querschnitt durch die Kruste des Kaapvaal Kratons zu repräsentieren.
2. Neben der Vredefort Struktur gibt es nur noch eine weitere Struktur dieses Ausmaßes - das Sudbury Basin in Ontario, dessen Ursprung ebenfalls auf Impaktprozesse zurückgeführt wird. Beide Komplexe sind von enormer wirtschaftlicher Bedeutung - Sudbury wegen der Sulfidvorkommen im Sudbury Igneous Complex, und Vredefort wegen seiner zentralen Lage zu den Gold-Uran-Vorkommen des Witwatersrand Basins.
3. Darüber hinaus ist die Vredefort Struktur die Typlokalität für Pseudotachylit, dessen Genese derzeit verbreitet diskutiert wird. Auf Grund der Kontroverse, ob die Vredefort Deformationserscheinungen durch Stoßwellen-Metamorphose oder durch intern-geologische "high strain-rate" Prozesse verursacht wurden, ist diese Struktur direkt in die Debatte um die Erkennungsmerkmale von Impakt-charakteristischen Gesteins- oder Mineral-Deformationen einbezogen. Und diese Debatte liegt im Kern der Auseinandersetzung um die Ursache der katastrophalen Vorgänge an der Kreide/Tertiär Grenze.
4. Verschiedene große Minengesellschaften mit Aktivitäten im Witwatersrand Basin haben in den letzten Jahren erkannt, daß detaillierte Kenntnis der Deformationsereignisse und damit verbundenen Deformationsstrukturen in und um den Vredefort Dom von größter Bedeutung für die Struktur-Analyse im Witwatersrand Basin selber ist.

Seit einer internationalen Tagung im Jahre 1987 in der Vredefort Struktur mit dem Thema "Cryptoexplosions and Catastrophies in the Geological record, with a special focus on the Vredefort structure" sind zahlreiche neue Informationen und Forschungsergebnisse von Bedeutung für das Verständnis der Genese der Vredefort Struktur veröffentlicht worden. Es ist das Ziel dieses Beitrags, diese wichtigen Ergebnisse summarisch vorzustellen und kritisch in Bezug auf die diversen Hypothesen auszuwerten. Es würde dabei den Rahmen dieses Artikels bei weitem sprengen, wenn alle diesbezügliche Literatur aufgelistet würde. In letzten Jahren sind jedoch einige Publikationen erschienen, die beachtliche Zusammenstellungen sowohl der älteren als

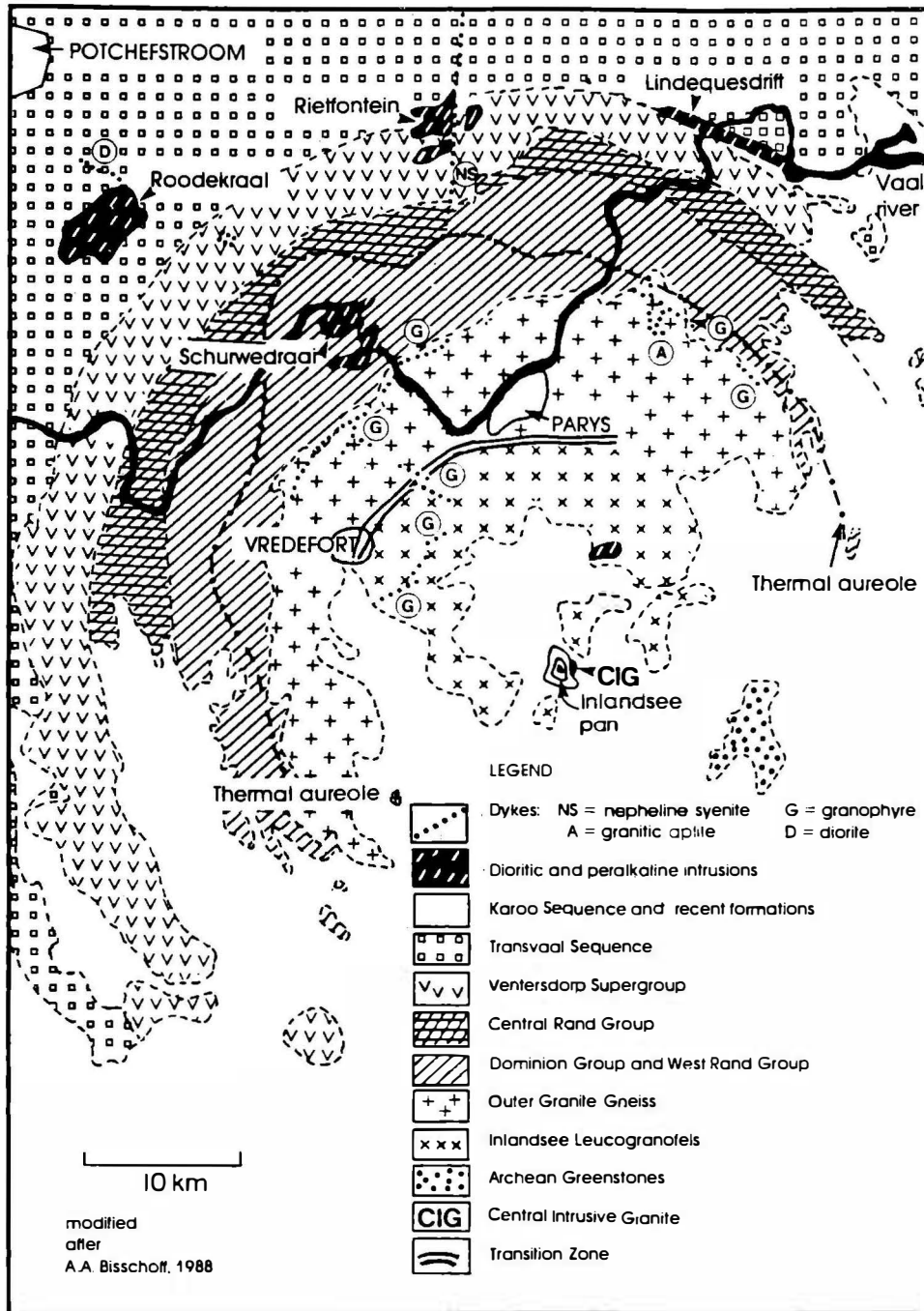


Abb. 1: Schematische Darstellung der Geologie in der Vredefort Struktur, nach REIMOLD (1991) und modifiziert nach BISSCHOF (1988).

auch der neueren Literatur darstellen. Dies sind zum Beispiel einige Beiträge zu den Proceedings der Tagung 1987 (NICOLAYSEN und REIMOLD, 1990; REIMOLD und WALLMACH, 1991), wobei letztere Autoren besonders auf die jüngeren Arbeiten

verweisen.

2. Die Geologie und Geophysik der Vredefort Struktur

Abb. 1 repräsentiert eine vereinfachte Darstellung der Geologie der Vredefort Struktur (nach REIMOLD, 1991). Der südliche und südöstliche Teil der Struktur ist weitgehend unter phanerozoischen (Karoo) Vulkaniten und Metasedimenten verborgen, während weiter nördlich ausgezeichnete Aufschlußverhältnisse detaillierte geologische Untersuchungen erlauben.

Die Struktur gliedert sich zum einen in den Kern-Bereich, der von Archaischen Granit/Granodiorit-Gneisen gebildet wird, und zum anderen in den sogenannten "Collar" um das kristalline Grundgebirge herum, der aus steilgestellten oder überkippten suprakrustalen Gesteinen besteht. Demgegenüber haben Bohrungen im Süden des Domes gezeigt, daß hier die Collar-Schichten subhorizontal liegen.

Auf Grund von chemischen und Isotopen-Untersuchungen wurde das Grundgebirge in einen äußeren Ring aus sogenanntem Outer Granite Gneiss (OGG) und einen inneren Bereich aus Inlandsee Leucogranofels (ILG) gegliedert (STEPTO, 1990). OGG und ILG werden durch die Transition Zone getrennt (Abb. 1), ein Bereich, der auch Vredefort Discontinuity (VD) genannt wird und durch weitverbreitete Vorkommen von charnockitischem Gneis, von Pseudotachylit und von Pseudotachylit durchschlagenem Dolerit gekennzeichnet wird. Die VD wird von einigen Autoren als eine bedeutende intrakrustale Störungszone angesehen, zum Beispiel als eine archaische lithologische Grenzfläche, entlang der Überschiebung stattgefunden haben könnte, oder als ein Decollement, das in Verbindung mit einer wichtigen schichtparallelen Gleitfläche, der Black Reef Decollement Zone, im nördlichen Witwatersrand Basin stehen könnte (HART et al., 1990a; FLETCHER und REIMOLD, 1989). Ein noch ungelöstes Problem in Verbindung mit der VD ist, ob ihr Verlauf Hufeisen-förmig zwischen OGG und ILG ist (wie von HART et al., 1990a, angenommen wurde), oder ob es sich um ein NE-SW verlaufendes Lineament im Sinne von FLETCHER und REIMOLD (1989) handelt. HART et al. (1990b) führen ferner aus, daß im Zentrum der Struktur ultramafische Gesteine des oberen Erdmantels in einem Bohrloch erschlossen worden. Weitverbreitet ist die Auffassung, daß der Kern der Vredefort Struktur einen kompletten Querschnitt durch die Kruste des Kaapvaal Kratons darstellt, der im Zuge der Vredefort Katastrophe vertikal gestellt wurde ("crust-on-edge" Modell; SLAWSON, 1976).

Der Collar um den granitischen Kern besteht aus Metavulkaniten und -sedimenten der Dominion Group entlang des Kontakts zum Kistallin. Die Strata der Dominion Group werden weiter nach außen von den Witwatersrand und Ventesdorp Supergroups sowie der Transvaal Sequenz gefolgt. All diese Schichten sind von zahlreichen, meist schichtparallelen mafischen Intrusionen (sog. Epidiorit) durchschlagen, die in bestimmten Sektoren bei 30% der Stratigraphie ausmachen, aber noch nicht datiert wurden. Einige große Alkaligranit-Intrusionen mit assoziierten mafischen und ultramafischen Gesteinen werden innerhalb und außerhalb des Collars angetroffen. Zahlreiche weitere Intrusionskörper finden sich im zentralen Kern. Ein großes Gebiet im Südosten wird von "Greenstones" eingenommen. Alle vorgenannten Gesteine (mit Ausnahme einiger mafischer Körper) werden von Pseudotachylit-Gängen durch-

schlagen, aber es gibt noch zwei weitere Gesteinsarten, die bisher als jünger als der Vredefort Pseudotachylit (und daher als das Vredefort-Ereignis) angesehen wurden. Dies sind ein lokal begrenzter Wherlit/Gabbro-Körper ca. 8 km nordöstlich vom zentralgelegenen Inlandsee (Abb. 1), sowie einer Reihe von gangartiger Granophyr-Vorkommen (G in Abb. 1), die sich entlang des Kontakts zwischen Kern und Collar oder in NE-SW und NW-SE Richtung innerhalb des Kristallins erstrecken. Diese Granophyr-Vorkommen sind sowohl texturell als auch chemisch einzigartig. Sie werden von den Verfechtern der Impakt-Hypothese als vermutliche Impaktschmelz-Gänge betrachtet, während andere den Granophyr entweder als massiven Pseudotachylit oder als mafisches Magma mit assimiliertem Krustenmaterial gedeutet haben. Petrographische und chemische Details können zum Beispiel bei FRENCH et al. (1989) und bei REIMOLD et al. (1990a) gefunden werden. Letztere weisen auch auf begrenzte Deformations-Strukturen in Granophyr-Gängen hin.

Weitere Informationen über die Geologie der Vredefort-Struktur finden sich in mehreren Beiträgen zu NICOLAYSEN und REIMOLD (1990) sowie bei BISSCHOFF (1971a,b, 1973, 1988).

ANTOINE et al. (1990) und CORNER et al. (1990) diskutieren im Detail Gravimetrie und Aeromagnetik über die Vredefort Region. Die auffälligsten Anomalien sind - für den ersten Fall - eine positive Schwereanomalie im Zentrum des Domes, und, im zweiten Fall, eine Hufeisen-förmige positive magnetische Anomalie, die dem vermeintlichen Kontakt zwischen OGG und ILG folgt. Beide Datensätze zeigen die Form der Vredefort-Struktur als ein Polygon, anstatt eine Kreisform. Die zentrale Schwereanomalie wurde von einigen Autoren als Hinweis auf einen mafischen Komplex gedeutet, der seinerseits als Quelle von volatilen Phasen, die für eine Explosionskatastrophe benötigt werden, gesehen wird. HART et al. (1990b), wie schon erwähnt, nehmen stattdessen an, daß es sich eher um Material des oberen Erdmantels handelt. CORNER et al. (1990) spekulieren, daß die Ursache für die magnetische Anomalie in eine Magnetit-reichen Granit-Lage zu sehen wäre; aber man sollte auch bedenken, daß diese Zone auch besonders reich an Pseudotachylit ist, der gegenüber dem Gneis an Fe und Mg angereichert ist.

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten neueren und älteren Fakten vorgestellt.

3. Der Vredefort Pseudotachylit

Das wohl auffälligste Deformations-Phänomen in der Vredefort Struktur stellen die Pseudotachylit-Vorkommen dar. BISSCHOFF (1962) präsentierte eine erste Zusammenstellung von Geländebeobachtungen und petrographischen Daten. In den letzten Jahren wurden vor allem die räumliche Verteilung der Vorkommen im Kern und Orientierungs-Untersuchungen an Pseudotachylit-Gängen durchgeführt (KILLICK und REIMOLD, 1990; FLETCHER und REIMOLD, 1989). Dabei stellte sich heraus, daß im Zentrum der Struktur kaum Brekzien-Vorkommen anzutreffen sind, daß aber entlang der Vredefort Diskontinuität und entlang eine weiteren NE-SW streichenden Störungszone gerade südlich des Inlandsees (Mara Decollement Zone, REIMOLD et al., 1990b) eine definitive Anreicherung existiert. Die Pseudotachylit-Vorkommen im Collar sind generell an schichtparallele Verwerfungen gebunden, und die

Überwiegende Mehrzahl der Gänge im Kern folgt den primären Schwächezonen (vor allem NE-SW und NNW-SSE), die COLLISTON und REIMOLD (1991) auf archaische Tektonik zurückführen. In zahlreichen Aufschlüssen wurden mehr als eine Generation von Pseudotachylit erkannt (siehe auch Kapitel 8).



Abb. 2: Eindruck eines massiven (Netzwerk-Brekzie) Pseudotachylit-Vorkommens aus der Übergangszone zwischen OGG (Outer Granite Gneiss) und ILG (Inlandsee Leuco Granite).

Bis vor wenigen Jahren wurden Pseudotachylit-Vorkommen im südlichen Afrika nur mit der Vredefort Struktur in Verbindung gebracht. Seit 1986 ist aber bekannt, daß solche Brekzien und andere Arten von Tektoniten auch im nördlichen und westlichen Teil des Witwatersrand Basins weitverbreitet sind (REIMOLD et al., 1986). Da auch hier mehrere Generationen von Brekzien erkannt wurden und Quarzeinschlüsse in Pseudotachylit gelegentlich ähnliche Mikrodeformationen wie Vredefort Gesteine aufweisen, erscheint es von größter Wichtigkeit zu sein, zu überprüfen, ob ein direkter Bezug zwischen Vredefort und Witwatersrand Brekzien besteht. Letztere sind überwiegend an bedeutende schichtparallele Störungszonen gebunden, oder treten

entlang von nord-südlich verlaufenden Verwerfungen auf (KILLICK et al., 1988; FLETCHER und REIMOLD, 1989).

Zahlreiche chemische Analysen von Vredefort Pseudotachyliten und ihren Wirtsgesteinen werden in REIMOLD (1991) diskutiert. Abbildung 2 zeigt ein Vorkommen von massivem Pseudotachylit (sogenannte Netzwerk-Brekzie) in charnockitischem Gneis vom OGG-Typ aus der Übergangszone zwischen OGG und ILG.

4. Mikrodeformationen in Vredefort Gesteinen

Neben den Funden von Coesit und Stishovit in Quarzit vom nordöstlichen Collar (MARTINI, 1978) werden vor allem die häufig beobachteten sogenannten "planar features" (planare Mikrodeformations-Strukturen) in Quarz aus Gesteinen von Collar und Kern von den Befürwortern der Impakt-Hypothese als Beweis für diesen Bildungsprozess hervorgehoben. Lamellare "planar features" werden generell als Impakt-charakteristische Stoßwellen-Deformation betrachtet (z.B., ALEXOPOULOS et al., 1988). Aber im Zuge der Kontroverse um die entweder durch Impakt, oder durch interne Prozesse verursachte Katastrophe an der Kreide/Tertiär-Grenze ergab sich, daß aller Wahrscheinlichkeit nach verschiedene Arten von planaren Mikrodeformations-Strukturen (PDS) in Quarz auftreten, die, wenigstens teilweise, keineswegs impakt-charakteristischer Natur sind.

Was die PDS in Vredefort Quarz betrifft, so hat REIMOLD (1990) gezeigt, daß die Mehrzahl der Vredefort-Beobachtungen nicht den von ALEXOPOULOS et al. (1988) aufgestellten Kriterien für die Erkennung von bona fide "planar features" genügen. Im Gegenteil, häufig konnten Relikte von planaren Brüchen identifiziert werden, und Parameter wie Planarität, Länge, Abstand zwischen "features", etc. weisen von den Werten für Stoßwellen-produzierte "planar features" ab. Darüberhinaus wurden mehr als eine Generation von Mikrodeformationen in Vredefort Quarz beschrieben (LILLY, 1978; eigene Beobachtungen). Die Häufigkeit des Auftretens von planaren und nicht-planaren Mikrodeformationen in Quarz und Feldspat wurden entlang von radialen Profilen im Kern der Vredefort Struktur bestimmt. Dabei zeigte sich keine Zunahme des Deformationsgrades zum Zentrum der Struktur hin (unter Berücksichtigung des Rekrystallisationsgrades in allen untersuchten Proben). Vielmehr ergab sich maximale Deformation in der Transition Zone.

Es wurde bereits erwähnt, daß PDS vom Vredefort-Typ auch in Quarzeinschlüssen in Witwatersrand Pseudotachylit beobachtet wurden. Sie wurden auch von anderen, ein tektonischen Pseudotachylit-Vorkommen beschrieben (BRANDL und REIMOLD, 1990). Histogramme der kristallographischen Orientierungen von PDS in Quarzeinschlüssen von Vredefort, Witwatersrand und tektonischem Pseudotachylit sind sehr ähnlich (BRANDL und REIMOLD, 1990). REIMOLD (1990) schlug daher vor, daß die Vredefort PDS möglicherweise typisch für die generelle Genese von Pseudotachylit sind und verlangte, daß eine umfassende Untersuchung der Mikro-Struktur von verschiedenen PDS-Typen und -Vorkommen durchgeführt werde (insbesondere mit SEM und TEM Methodik). Erst nach Abschluß einer solchen Studie würde es klar werden, ob Vredefort PDS durch Stoßwellen oder durch andere tektonische Prozesse gebildet wurden.

Zwei Serien von Stoßwellen-Experimenten wurden mit Witwatersrand Quarzit (Proben bei Raumtemperatur gehalten und vorgeheizt zu ca. 450°C) durchgeführt. Während typische "planar features" vom Impakt-charakteristischen Typ (ALEXOPOULOS et al., 1988) erzeugt wurden, konnten keine Ähnlichkeiten der experimentell erzeugten PDS zum Vredefort PDS aufgezeigt werden.

Neben diesen kontroversen Quarz-Mikrodeformations-Strukturen sind bisher von keinem anderen Mineral in Vredefort Gesteinen Stoßwelleneffekte beschrieben worden. Selbst in nur teilweise rekristallisierten Proben von Bohrkernen aus dem Zentrum der Struktur konnten keine signifikanten Mineral- oder Gesteinsdeformationen nachgewiesen werden. Eine weitere unbedingt notwendige Untersuchung zur Klärung des Vredefort-Problems wäre eine mikrostrukturelle Studie der Feldspäte in Proben aus verschiedenen Zonen des Domes.

5. Hochdruck-Modifikationen von Quarz

Coesit und Stishovit wurden von MARTINI (1978) von einigen Pseudotachylit-Gängchen in Quarzit des äußeren Collars im NE-Sektor der Vredefort Struktur beschrieben. Der gleiche Autor scheint diese Hochdruck-Minerale in weiteren Quarzit-Proben von anderen Bereichen des Collars ebenfalls beobachtet zu haben (MARTINI, pers. Mitt., 1990), und McHONE und NIEMAN (1988) wiesen die Existenz von Stishovit in Vredefort Proben mit Hilfe von Magnetischer Kernresonanz (NMR) nach. Hier müssen nun die folgenden Fragen gestellt werden: Warum finden sich diese Hochdruck-Minerale nur in derartigen Pseudotachylit-Gängen? Warum haben sie den Zeitraum von ca. 2 Ga seit dem dynamischen Deformations-Ereignis (siehe Kapitel 8.) unbeschadet überlebt? Welche Bedeutung hatten die damaligen Druck- und Temperaturbedingungen in diesen Quarzit-Schichten (ca. 200-250°C und wenigstens 1.5 kbar) für die Bildung von Coesit und Stishovit?

AKAOGI und NAVROTSKY (1984) teilten mit, daß Stishovit in Paragenese mit Quarzglas (wie in diesen Vredefort Proben) bei wesentlich niedrigeren Drucken (ca. 40 kbar) als sonst (ca. 80 kbar) gebildet werden kann. Eine detaillierte Mikrostrukturanalyse einer solchen Pseudotachylit/Coesit/Stishovit-Paragenese vom Vredefort Dom steht noch aus. Im Hinblick auf die variablen Pseudotachylit-Alter, wie sie in Kapitel 8. diskutiert werden, sollte man auch versuchen, solche mit Hochdruck-SiO₂ assoziierten Pseudotachylite zu datieren.

6. "Shatter cones"

Shatter cones (Strahlenkegel) wurden von zahlreichen Impaktkratern beschrieben und werden weitverbreitet als wichtiges Erkennungsmerkmal solcher Strukturen anerkannt. HARGRAVES (1961) und MANTON (1965) beschrieben Strahlenkegel aus der Vredefort Struktur.

Anlässlich des Cryptoexplosions-Workshop 1987 im Vredefort Dom berichteten NICOLAYSEN und REIMOLD (1987) über sogenannte MSJS (Multiple-Striated Joint Sets) Systeme - engständige parallele "sets" von subplanaren bis curviplanaren makroskopischen oder mikroskopischen Brüchen, deren Bruchflächen generell von

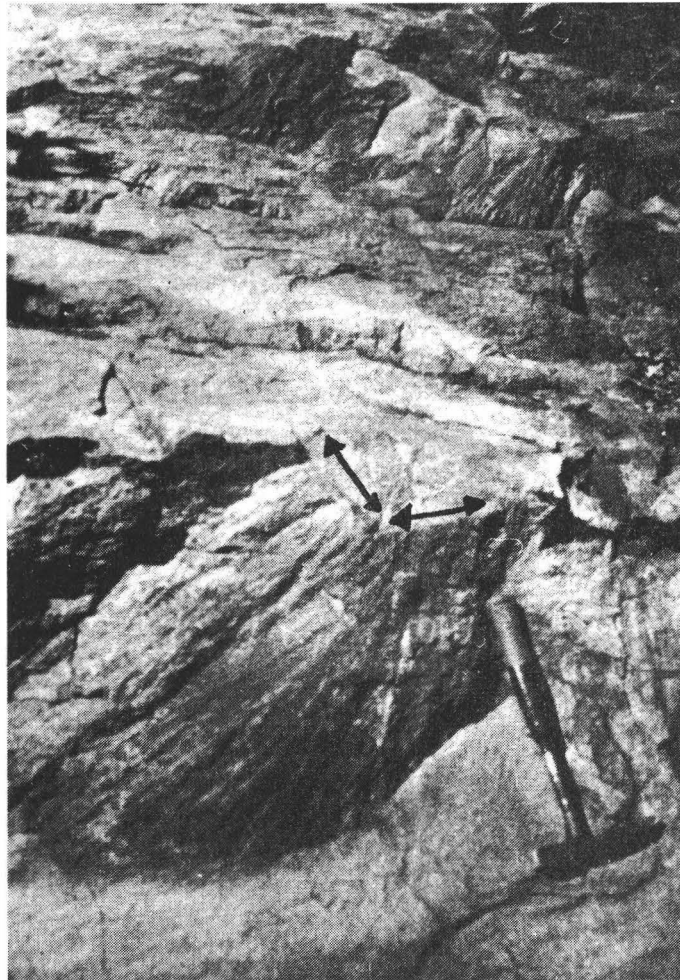


Abb. 3: "Shatter cones" von der Vredefort Struktur. Es wird deutlich, daß die bestentwickelten "Strahlenkegel" oder "striated surfaces" in Richtung des Einfallens der Schichtflächen gebildet wurden. Diese Aufnahme zeigt aber auch, daß eine direkte Beziehung zwischen mehreren Bruchsystemen (sog. MSJS) und den curviplanaren oder Kegel-Segment-förmigen Deformations-Strukturen besteht (wie durch Pfeile akzentuiert). Dieser Aufschluß befindet sich in Jeppetown Shale Formation des nordwestlichen Collar-Sektors.

Strahlen (striations) bezogen sind. Diese Autoren zogen in Erwägung, daß Interferenz von mehreren solcher MSJS Systeme Strahlenkegel verursachen könnten (Abb. 3). Eigene Geländebeobachtungen im Gesamtbereich der Vredefort Struktur zeigen, daß MSJS nicht nur auf den Ringbereich beschränkt sind. REIMOLD et al. (1990a) nehmen an, daß sie sogar im bisher als undeformiert geltenden Granophyr auftreten. MSJS (und shatter cones), wenn sie in der Tat gemeinsam mit dem Pseudotachylit als Resultat von Stoßwellenkompression gebildet worden wären, sollten im Gelände als synchrone Deformation mit dem Pseudotachylit erkennbar sein. Stattdessen findet man jedoch häufig, daß MSJS Pseudotachylit-Gänge durchschlagen (z.B. Abb. 4).

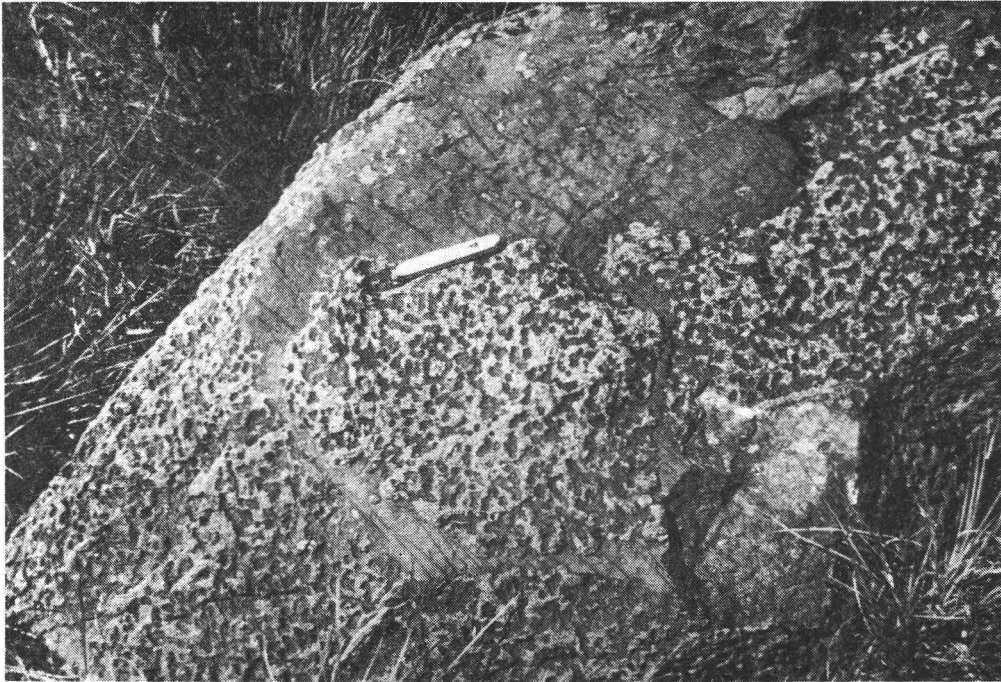


Abb. 4: Mehrere subparallele "sets" von MSJS (Multiple-Striated Joint Sets) überprägen ein Pseudotachylit-Vorkommen in Cordierit-Andalusit-Hornfels aus der Nähe des Kontakts zwischen Kern und Collar (NW-Sektor).

7. Der eigenartige Granophyr

Der Vredefort Granophyr zeichnet sich durch eine einzigartige chemische Zusammensetzung aus, die darüberhinaus noch allen Vorkommen gemeinsam ist (regionale Homogenität): 67 Gew% SiO_2 , 7 Gew% Fe_2O_3 (Gesamteisen), 3.5 Gew% MgO und 3.7 Gew% CaO. Äußerlich erscheint der Granophyr sehr ähnlich zum Pseudotachylit. Er enthält zahllose Einschlüsse von Granit, Quarzit und Tonschiefer, wobei Granit- und Quarzit-Fragmente bei weitem überwiegen (selbst in Aufschlüssen, die mehrere km vom nächsten Collar-Quarzit-Vorkommen entfernt sind). Die Matrix-Mineralie (ein typische Eindruck der mikropegmatitischen Matrix wird in Abb. 5 vermittelt) sind praktisch frei von Deformation (einzelne Kristalle weisen irreguläre, intragranulare Brüche auf), aber curviplanare Brüche (MSJS) in Granophyr und in zwei Aufschlüssen dünne Gängchen von Pseudotachylit wurden beschrieben (REIMOLD et al., 1990a).

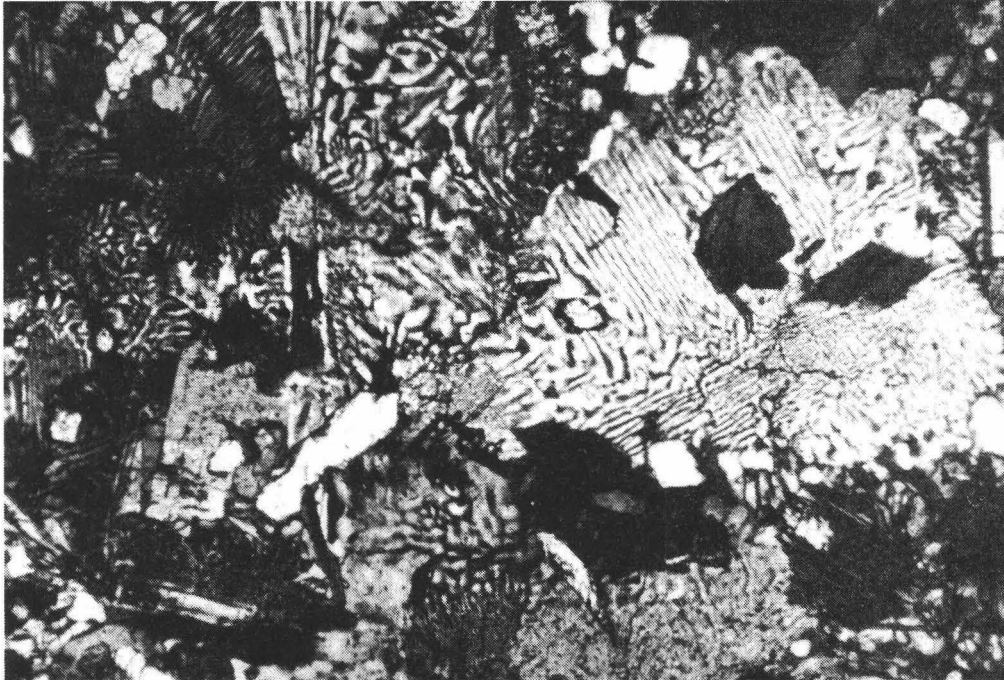


Abb. 5: Eine Mikrofotografie der Matrix einer typischen Granophyr-Probe aus der Vredefort-Struktur. Die mikropetrographische Matrix, wie sie hier gezeigt wird, besteht im wesentlichen aus Quarz, Plagioklas und Alkali-Feldspat. Im linken unteren Teil des Bildes ist ein teilweise randlich korrodiertes Plagioklas-Fragment (hell) erkennbar. Die Bildbreite entspricht einer wahren Distanz von 1,5 mm (fotografiert mit gekreuzten Polarisatoren).

Mischungsrechnungen ergaben, daß es möglich ist, die chemische Zusammensetzung des Granophyrs als Resultat von zwei verschiedenen Mischungsprozessen zu erklären: FRENCH und NIELSEN (1990), die den Granophyr als Impaktschmelze ansehen, mischen eine mafische Komponente mit Granit und Quarzit, während REIMOLD et al. (1990a) 60-75 % Granit und 10-25% Tonschiefer mit 4-10 % Quarzit aufschmelzen. Es erscheint von größter Bedeutung zu sein, daß bisher weder Einschlüsse eines mafischen Primärgesteins, noch petrographische oder chemische Hinweise auf eine mafische Mischungskomponente gefunden wurden. Bisher konnten keine Stoßwellen-deformierte Einschlüsse entdeckt werden. Die folgende Tabelle vergleicht die Vor- und Nachteile der verschiedenen genetischen Hypothesen für den Granophyr:

HYPOTHESE	PRO	CONTRA
A Impaktschmelzgestein	regionale Homogenität; thermische Deformationerscheinungen in Einschlüssen	Struktur-kontrollierte Platznahme der Gänge; <u>keine</u> Stoßwelleneffekte in Einschlüssen; <u>keine</u> Hinweise auf mafische Komponente
B Assimilationsmodell	Mischungsrechnungsmodell: ~ 25% mafische Komp. + Krustengesteine	<u>kein</u> Hinweis auf mafisches Magma; regionale Homogenität; ist Assimilation von ~ 75 Vol% möglich?
C Pseudotachylit-Äquivalent (HALL und MOLENGRAAFF, 1925)	texturell ähnlich; Platznahme ähnlich; ebenfalls <u>keine</u> Stoßwellendeformation	regionale Homogenität; keine andere Präzedenz für solche Volumen von massivem Pseudotachylit

Offensichtlich spricht die regional-homogene chemische und mineralogische Zusammensetzung der Granophyr-Vorkommen stark für die Impakt-Hypothese, aber nach wie vor liegen keine direkten Beweise, zum Beispiel in Form von Stoßwellendeformierten Einschlüssen, vor. Weitere detaillierte Untersuchungen mit petrographischen, Isotopen- und experimentellen Methoden sind gefragt.

8. Neuere geochronologische Resultate

Eine gute Zusammenstellung der früheren geochronologischen Arbeiten an Gesteinen aus der Vredefort Struktur findet sich bei WALRAVEN et al. (1990).

NICOLAYSEN et al. (1963) führten die ersten radiometrischen Altersbestimmungen an Vredefort-Gesteinen aus. Sie kamen zu dem Schluß, daß das katastrophale Ereignis vor ca. 1960 Ma stattgefunden haben müßte, ein Alter, das durch die Diskrepanz der Alter des vermeintlich undeformierten Granophyrs und der deformierten Alkaligranite festgelegt werde. Ungefähr 20 Jahre später wurden dann die Resultate einer umfassenden Rb-Sr, U/Th-Pb und Pb-Pb Untersuchung des kristallinen Grundgebirges von HART et al. (1981) vorgelegt. Diese ergab für den OGG ein Alter von 3080 Ma, während der ILG ein Rb-Sr-Alter von 2780 Ma aufzeigte. Diese Arbeit ergab auch Hinweise auf noch ältere Krustenkomponenten mit Altern um ca. 3500 Ma. Eine Rb-Sr-Datierung des kleinen Granitkomplexes (Central Intrusive Granite, Abb. 1) im Zentrum der Struktur ergab ein Alter von 1944 ± 92 Ma. Dieser kleine Körper wurde später als axiale Schmelze eines impaktogenen "central uplifts" interpretiert. Seitdem wurde eine Anzahl von Rb-Sr-Biotit-Gesamtgesteinsaltern an OGG und ILG-Proben bestimmt (REIMOLD et al., 1988), die den Zeitraum von ca. 2.4 - 2.2 Ga umspannen.

^{40}Ar - ^{39}Ar -Alter für Mineral- oder Gesamtgesteinsproben von Alkali-Granit, Granophyr und OGG (ALLSOPP et al., 1991) liegen alle um etwa 2000 - 2050 Ma, wobei weitere Hinweise (SHRIMP-Zirkon-Datierung, zitiert in WALRAVEN et al., 1990) darauf deuten, daß der Granophyr tatsächlich ca. 2000 Ma alt ist, aber die Alkali-Granite nur Minimal-Alter ergaben.

Da Beobachtungen von mehreren Generationen von Pseudotachylit gemacht worden waren, führten REIMOLD et al. (1990c) ^{40}Ar - ^{39}Ar -Datierungen an mehreren Pseudotachylit-Proben durch, mit folgendem Resultat: Alter von 2.25 ± 0.04 (K-Ar), 2.01 ± 0.06 , 1.39 ± 0.08 , 1.39 ± 0.08 , 1.33 ± 0.04 , und 1.09 ± 0.10 Ga wurden gemessen. Diese Autoren schlugen vor, daß es durchaus möglich sei, daß diese Alter Pseudotachylit-Bildungsalter repräsentierten, da es regional keine Hinweise auf partielle oder vollständige Equilibrierung der K-Ar und Rb-Sr Isotopensysteme gebe. Dennoch sollten diese Resultate weiteren Tests unterzogen werden. Inzwischen liegen ^{40}Ar - ^{39}Ar -Altersspektren für verschiedene Minerale aus den Wirtsgesteinen von zwei der "jungen" Pseudotachylite vor: Biotit- und Hornblende-Analysen für die erste Probe ergaben Plateaualter von 2.07 ± 0.01 und 3.03 ± 0.03 Ga - ganz offensichtlich wurde in diesem Fall das Ar-Isotopensystem seit etwa 2000 Ma nicht mehr equilibriert. Für die zweite Probe wurden allerdings Mischalter zwischen 1.78 und 1.39 Ga für vier verschiedene Mineralseparate erzielt. Dies wird von REIMOLD et al. (1990d) auf hydrothermale Prozesse, die dieses Gestein nachhaltig zum Zeitpunkt der Pseudotachylit-Genese beeinflussten, zurückgeführt.

Vor kurzem berichteten WALRAVEN und Eisenboek (Beitrag zu einem Vredefort Workshop, Univ. of the Witwatersrand, November 1990) über neue Isotopenanalysen, die darauf hindeuten, daß die Alkaligranit-Intrusionen um den Dom erheblich älter als bisher angenommen sind, nämlich etwa 2150 - 2200 Ma.

Folgende Schlußfolgerungen können nun auf der Basis dieser Datensammlung gemacht werden: Die Region der Vredefort Struktur wurde vor ca. 2.05 Ga von einem starken thermischen Ereignis überprägt; es muß dabei darauf verwiesen werden, daß dieser Zeitpunkt exakt mit der Platznahme des Bushveld Komplexes zusammenfällt. Dieses Ereignis hat den gesamten Dom ziemlich nachhaltig betroffen, aber es ist dennoch möglich, eine weitere Phase von Aktivität zwischen 2.4 und 2.2 Ga festzustellen. Es erscheint durchaus möglich, daß Pseudotachylit zu verschiedenen Zeiten, um 2.2, 2.0 und 1.4 - 1.1 Ga, gebildet wurde, wobei man nicht übersehen sollte, daß lokal andere post-2.0 Ga magmatotektonische Prozesse Reequilibrierung verursacht haben könnten (zum Beispiel der 1.2 - 1.4 Ga Pilanesberg/Piensaars River Alkali-Magmatismus, dem einige Dykes im Bereich Vredefort/Witwatersrand Basin zugeschrieben werden). Das dynamische Vredefort-Ereignis müßte zwischen ca. 2.15 und 2.0 Ga eingestuft werden, in welchem Zeitraum der Bushveld Magmatismus stattfand.

9. Die reflexionsseismische Traverse durch den nordwestlichen Teil der Vredefort Struktur und einige Ergebnisse von neueren Geländeuntersuchungen

Der Geological Survey of South Africa führte 1988 eine reflexionsseismische Profilstudie durch den gesamten nordwestlichen Teil des Witwatersrand Basins bis zum Zentrum des Vredefort Domes durch. Es wurde gehofft, daß die Krusten-Struktur

im Bereich des Domes damit weiter erkundet werden könnte. Das Ergebnis läßt aber noch viele Wünsche offen, denn bis auf einige subhorizontale Reflektoren wurden im Bereich der Vredefort Struktur fast keine Daten aufgezeichnet. Daß dies auch im Bereich des Collars der Fall ist, wird durch die Schwierigkeit, generell steilstehende Schichten zu registrieren, erklärt. Die subhorizontalen Strukturen im Bereich des Kerns werden von verschiedenen Autoren als subhorizontale Intrusionen, Brekzierungszonen, oder Überschiebungsflächen gedeutet. FLETCHER und REIMOLD (1989) und REIMOLD et al. (1990b) sehen einen möglichen Zusammenhang zwischen schwach erkennbaren, leicht nordwärts einfallenden Vibroseis-Strukturen und den NE-SW-streichenden Störungszonen auf dem Dom (Vredefort Diskontinuität und Mara Decollement Zone) sowie den korrespondierenden Gleitflächen im nördlichen Witwatersrand Basin (Black Reef Decollement Zone, Master bedding Fault - FLETCHER und REIMOLD, *ibid*).

Eine detaillierte Struktur-Analyse im nordwestlichen und südöstlichen Teil des Domes (COLLISTON und REIMOLD, 1991) ergab, daß der kristalline Sockel im wesentlichen archaische Strukturen aufweist. Nur lokal können Scherzonen von ungefährem 2.2 - 2.0 Ga-Alter beschrieben werden. Im Zentrum der Struktur kann kaum Deformation, die mit dem 2.0 Ga Zeitpunkt in Verbindung gebracht werden könnte, erkannt werden. COLLISTON und REIMOLD (1991) haben daher vorgeschlagen, daß es unumgänglich sei, neben den existierenden Hypothesen für eine katastrophale Bildung der Vredefort Struktur einen möglicherweise rein tektonischen Ursprung in die Diskussion mit einzubeziehen (siehe auch FLETCHER und REIMOLD, 1989 und KILLICK und REIMOLD, 1990).

10. Für und Wider der Impakt-Hypothese

Die wesentlichsten Argumente zugunsten einer Genese der Vredefort Struktur durch Asteroiden-Einschlag sind:

- die Struktur wird als kreisförmig angesehen;
- sie ist von ringförmigen Störungen umgeben;
- der Dom selbst wird als Zentralberg einer Impakt-Struktur angesehen;
- steilgestellte oder überkippte Stratigraphie vom Zentrum auswärts ("crust-on-edge" Modell);
- Strahlenkegel;
- Quarz-Hochdruckmodifikationen;
- Pseudotachylit wird als Schockbrekzie interpretiert;
- Granophyr wird als Impaktschmelzgestein angesehen.

Demgegenüber weisen die Vertreter anderer Hypothesen auf folgende Fakten hin:

- die Struktur ist asymmetrisch, polygonal anstatt kreisförmig;
- die Stratigraphie im Süden ist subhorizontal;
- das "crust-on-edge" Modell scheint streng nur für den nördlichen Teil des Domes zu gelten;
- man findet kaum vertikale Strukturen und Deformationszonen, die mit einem ca. 2.0 Ga Ereignis in Beziehung zu bringen sind;
- kein Zuwachs des Deformationsgrads gegen das Zentrum der Struktur;

- bevorzugte Deformation entlang von NE-SW Lineamenten;
- mehr als eine Deformationsphase im Hinblick auf Pseudotachylit- und MSJS-Bildungen;
- ähnliche Deformations-Strukturen im Witwatersrand Basin, dort zum Teil von eindeutig tektonischem Ursprung;
- Beziehung der MSJS-Bruchsysteme zu den vermeintlichen Strahlenkegeln;
- Altersbeziehungen zwischen den verschiedenen Deformations-Phänomenen im Komplex.

Während es auf den ersten Blick schwierig erscheint, all diese Problempunkte mit einem Impaktmodell zu erklären, muß doch darauf verwiesen werden, daß uns fast jegliche Erfahrung in Bezug auf Struktur und Deformationserscheinungen in Impakt-Basins von der Größenordnung der Vredefort Struktur ($\approx 200 - 350$ km im Durchmesser) fehlt. Der Vredefort Fall ist besonders problematisch, da es sich um eine sehr alte und tief erodierte Struktur handelt.

Es muß außerdem erwähnt werden, daß HART et al. (1991) eine Hypothese aufgestellt haben, welche die Möglichkeit, daß es sich bei der Vredefort Struktur um eine nachträglich tektonisch modifizierte Impakt-Struktur handeln könnte, berücksichtigt. Diese Autoren weisen darauf hin, daß die beobachteten Strukturen und Deformationsgrade entweder durch vorgegebene archaische Inhomogenitäten in der Krusten-Stratigraphie beeinflußt oder sogar bestimmt worden sein könnten, oder daß post-katastrophale tektonische Aktivität (zum Beispiel entlang der Vredefort Diskontinuität) die Impakt-Struktur stark hätte verändern können.

Die meisten Argumente gegen die Impakt-Hypothese stehen natürlich auch im Widerspruch zu der zentralen Gasexplosions-Hypothese. Hierbei gibt es dann ein weiteres Problem, ob es überhaupt möglich ist, derartig gewaltige Energien, wie sie zu Bildung einer solchen gigantischen Struktur nötig wären, in der Erde aufzustauen. Es ist spekuliert worden, ob chemische Explosionsreaktionen innerhalb des Erdmantels solche Energiemengen produzieren könnten, aber nach wie vor fehlt jegliche natürlicher Beweis (oder Hinweis) für diese Möglichkeit. Was die Vredefort Struktur betrifft, so hat man die häufig beobachteten CO_2 -reichen Flüssigkeitseinschlüsse in Beziehung zu CO_2 -getriebenen Explosionen gebracht (z.B. NICOLAYSEN und FERGUSON, 1990), aber weitere Untersuchungen solcher Einschlüsse im Untergrund des Witwatersrand Basins sind angebracht, da durchaus die Möglichkeit besteht, daß diese volatilen Phasen schon zu Zeiten der archaischen Granulit-Metamorphose (die zumindest den ILG betraf) eine Rolle spielten.

11. Ausblick

Ein Überblick über die gesamte Vredefort Literatur würde vor allem zwei Tatsachen verdeutlichen:

1. Die vorhandene Datenbasis, im Hinblick auf fast alle geologischen Aspekte der Struktur, ist unvollständig und unbefriedigend. Und daraus ergibt sich zwangsläufig, daß
2. viel - zuviel - Spekulation und Vereinfachung in der Literatur enthalten ist.

Der Verfasser dieses Reviews ist der festen Ansicht, daß nur weitere detaillierte Gelände- und Laborarbeit uns näher an eine endgültige Lösung des Vredefort-Enigmas heranführen kann. Dabei sollten vor allem strukturgeologische Untersuchungen unter strikter Berücksichtigung von relativen und absoluten chronologischen Indikatoren, sowie mikropetrographische Analyse der Vredefort Deformations-Erscheinungen im Vordergrund stehen. Dieser letztere Aspekt hat auch signifikante Auswirkungen für unser generelles Verständnis von katastrophalen Ereignissen in der Erdgeschichte, zum Beispiel für die Diskussion um die K/T-Grenze, sowie für die Erkennung von alten, weitgehend erodierten Impakt-Strukturen.

Die Bedeutung der im Vredefort Dom weitverbreiteten mafischen Intrusionen ist bisher völlig unterschätzt worden, obwohl sie möglicherweise wertvolle Zeitmarken darstellen könnten. Weitere Tests der Anwendung der A-A-Methode für die Datierung von Pseudotachylit werden auch zeigen, ob dieses Verfahren sinnvoll ist für die direkte Datierung von tektonischen Ereignissen. Von einem wirtschaftsgeologischen Standpunkt aus gesehen ist es unerlässlich, weiter zu verfolgen, welche Auswirkungen die Bildung der Vredefort Struktur auf Entwicklung und/oder Modifikation des gesamten Witwatersrand Basins gehabt hat. Und welche Beziehung zwischen den bedeutenden Störungen, die über den Dom und im nördlichen Teil des Witwatersrand Basins verlaufen, besteht. STANISTREET und McCARTHY (1991) stellten kürzlich fest: "Der Vredefort Dom hinterließ jedoch einen bedeutenden strukturellen Eindruck auf das Witwatersrand Basin und könnte eine entscheidende Rolle in der Langzeit-Bewahrung (des Basins) bis zum heutigen Tag gespielt haben."

Danksagung

Ich bin der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft zu Dank verpflichtet für die Einladung zu diesem Vortrag, und für die Möglichkeit, dieses Review zu veröffentlichen. Während meines Aufenthaltes am Institut für Geochemie der Universität in Wien kam ich voll in den Genuß der österreichischen Gastfreundschaft. Ich möchte aber auch auf keinen Fall versäumen, allen Kollegen, in Südafrika und Übersee, mit denen ich im Laufe der Jahre an Vredefort-Problemen gearbeitet habe, für ihr Interesse und ihre Mitarbeit zu danken. Ohne ihre andauernde Unterstützung wäre es nicht möglich gewesen, viele der neueren Resultate zu erzielen.

Literatur

- AKAOGI, M., NAVROTSKY, A. (1984): The quartz-coesite-stishovite transformations: new calorimetric measurements and calculation of phase diagrams. - Phys. Earth Planet. Int., 36, 124-134.
- ALEXOPOULOS, J.S., GRIEVE, R.A.F., ROBERTSON, P.B. (1988): Microscopic lamella deformation features in quartz: discriminative characteristics of shock-generated varieties. - Geology, 16, 796-799.
- ALLSOPP, H.L., FITCH, F.J., MILLER, J.A., REIMOLD, W.U. (1991): $^{40}\text{A}/^{39}\text{A}$ stepheating age determinations relevant to the formation of the Vredefort Dome, South Africa. - S. Afr. J. Sci. (in press, to appear June/July 1991).
- ANTOINE, L.A.G., NICOLAYSEN, L.O., NICCOL, S.L. (1990): Processed and enhanced gravity and magnetic images over the Vredefort Structure and their interpretation. - Tectonophysics, 171, 63-74 (spec. iss., L.O.NICOLAYSEN, W.U.REIMOLD, editors).
- BISSCHOFF, A.A. (1962): The pseudotachylite of the Vredefort Dome. - Trans. geol. Soc. S.Afr., 65, 207-225.
- BISSCHOFF, A.A. (1971a): The dioritic rocks of the Vredefort Dome. - Trans. geol. Soc. S.Afr., 75, 31-45.
- BISSCHOFF, A.A. (1971b): Tholeiitic intrusions in the Vredefort Dome. - Trans. geol. Soc. S.Afr., 75, 23-30.
- BISSCHOFF, A.A. (1973): The petrology of some mafic and pre-alkaline intrusions in the Vredefort Dome, South Africa. - Trans. geol. Soc. S.Afr., 76, 27-52.
- BISSCHOFF, A.A. (1988): The history and origin of the Vredefort Dome. - S.Afr. J. Sci., 84, 413-417.
- BRANDL, G., REIMOLD, W.U. (1990): The structural setting and deformation associated with pseudotachylite occurrences in the Palala Shear belt and Sand River Gneiss, Northern Transvaal. - Tectonophysics, 171, 201-220 (spec.iss., L.O.NICOLAYSEN, W.U.REIMOLD, editors).
- COLLISTON, W.P. (1990): A model of compressional tectonics for the origin of the Vredefort structure. - Tectonophysics, 171, 115-118 (spec.iss., L.O.NICOLAYSEN, W.U.REIMOLD, editors).
- COLLISTON, W.P., REIMOLD, W.U. (1991): Structural studies in the Vredefort Dome; preliminary interpretations of results on the southern portion of the structure. - Econ. Geol. Res. Unit. Univ. of the Witwatersrand, Inf. Circ. No. 229, 31pp.
- CORNER, B., DURRHEIM, R.J., NICOLAYSEN, L.O. (1990): Relationships between the Vredefort Structure and the Witwatersrand Basin within the tectonic framework of the Kaapvaal Craton as interpreted from regional gravity and aeromagnetic data. - Tectonophysics, 171, 49-61.
- FLETCHER, P., REIMOLD, W.U. (1989): Some notes and speculations on the pseudotachylites in the Witwatersrand Basin and the Vredefort Dome, South Africa. - S.Afr. J. Geol., 92, 223-234.
- FRENCH, B.M., NIELSEN, R.L. (1990): Vredefort Bronzite Granophyre: chemical evidence for origin as a meteorite impact melt. - Tectonophysics, 171, 119-138.
- FRENCH, B.M., ORTH, C.J., QUINTANA, C.R. (1990): Iridium in the Vredefort Bronzite Granophyre: impact melting and limits on a possible extraterrestrial component. - Proc. 19th Lunar Planet. Sci. Conf., pp.733-744.
- HALL, A.L., MOLENGRAAFF, G.A.D. (1925): The Vredefort Mountain Land in the southern Transvaal and the northern Orange Free State. - Shaler Mem. Series, Verh. K. Akad. Wet. Amst., 2.sect., vol. 24, No.3, 183pp.

- HARGRAVES, R.B. (1961): Shatter cones in the rocks of the Vredefort ring. - *Trans. geol. Soc. S.Afr.*, 69, 499-516.
- HART, R.J., WELKE, H.J., NICOLAYSEN, L.O. (1981): Geochronology of the deep profile through Archaean basement at Vredefort, with implications for early crustal evolution. - *J. Geophys. Res.*, 86, 10663-10680.
- HART, R.J., ANDREOLI, M.A.G., TREDOUX, M., DE WIT, M. (1990a): Geochemistry across an exposed section of Archaean crust at Vredefort, South Africa: with implications for mid-crustal discontinuities. - *Chem. Geol.*, 82, 21-50.
- HART, R.J., ANDREOLI, M.A.G., SMITH, C.B., OTTER, M.L., DURRHEIM, R.J. (1990b): Ultramafic rocks in the centre of the Vredefort structure (South Africa): possible exposures of the upper mantle? - *Chem. Geol.*, 83, 233-248.
- HART, R.J., ANDREOLI, M.A.G., REIMOLD, W.U., TREDOUX, M. (1991): The variation of dynamic and thermal metamorphism across the Vredefort cryptoexplosion structure, with implications for its origin. - *Tectonophysics* (in press).
- KILLICK, A.M., REIMOLD, W.U. (1990): Review of the pseudotachylites in and around the Vredefort 'Dome', South Africa. - *S.Afr. J. Geol.*, 93, 350-365.
- KILLICK, A.M., THWAITES, A.M., SCHOCH, A.E., GERMS, G.J.B. (1988): Pseudotachylite associated with a bedding-parallel fault zone between the Witwatersrand and Ventersdorp Supergroups, South Africa. - *Geol. Rdsch.*, 77, 329-344.
- LILLY, P.A. (1981): Shock metamorphism in the Vredefort collar: evidence for internal shock sources. - *J. Geophys. Res.*, 86, B11, 10689-10700.
- MANTON, W.I. (1965): The orientation and origin of shatter cones in the Vredefort ring. - *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 123, 1017-1049.
- MARTINI, J.E.J. (1978): Coesite and stishovite in the Vredefort Dome, South Africa. - *Nature*, 272, 715-717.
- McHONE, J.F., NIEMAN, R.A. (1988): Vredefort stishovite confirmed using solid-state silicon-29 Nuclear Magnetic Resonance. - *Meteoritics*, 23, p.289.
- NICOLAYSEN, L.O., FERGUSON, J. (1990): Cryptoexplosion structures, shock deformation and siderophile concentration related to explosive venting of fluids associated with alkaline ultramafic magmas. - *Tectonophysics*, 171, 303-335.
- NICOLAYSEN, L.O., REIMOLD, W.U. (1987): Shatter cones revisited (working paper). *Contr. to Int. Worksh. on Cryptoexpl. and Catastr. in the Geol. Rec.*, Parys, July 1987. - Section N2, 8pp. BPI Geophysics, Univ. of the Witwatersrand.
- NICOLAYSEN, L.O., REIMOLD, W.U. - editors (1990): Cryptoexplosions and Catastrophies in the Geological Record, with a special focus on the Vredefort Structure (Proc. of an Int. Worksh., Parys, July 1987). - *Tectonophysics*, 171, No. 1/4, 422pp.
- NICOLAYSEN, L.O., BURGER, A.J., Van Niekerk, C.B. (1963): The origin of the Vredefort structure in the light of new isotopic data. - *Abstr. Int. U. Geodes. and Geophys. 13th Gen. Ass.*, Berkeley.
- REIMOLD, W.U. (1990): The controversial microdeformations in quartz from the Vredefort Structure, South Africa. - *S.Afr. J. Geol.*, 93, 645-663.
- REIMOLD, W.U. (1991): Geochemistry of pseudotachylite from the Vredefort Structure, South Africa. - *N. Jb. Miner. Abh.*, 162, 151-184.
- REIMOLD, W.U., WALLMACH, T. (1991): The Vredefort Structure under discussion. - *S.Afr. J. Sci.* (in press).
- REIMOLD, W.U., FLETCHER, P., Snowden, P.A., Wilson, J.D. (1986): Pseudotachylite - a general Witwatersrand phenomenon. - *Lunar Planet. Sci.*, XVII, 701-702. The Lunar and Planet. Inst., Houston.

- REIMOLD, W.U., COLLISTON, W.P., ROBERTSON, A.S. (1988): Chronological and structural work in the Vredefort Dome. - Ext. Abst., Geocongress '88, Durban, Geol. Soc. S.Afr., pp.501-504.
- REIMOLD, W.U., HORSCH, H., DURRHEIM, R.J. (1990a): The 'Bronzite'-Granophyre from the Vredefort Structure - a detailed analytical study and reflections on the origin of one of Vredefort's enigmas. - Proc. 20th Lunar Planet. Sci. Conf., pp.433-450.
- REIMOLD, W.U., FLETCHER, P., FERREIRA, C.A.M., COLLISTON, W.P. (1990b): The Vredefort Structure - new results, with a focus on structural aspects of the Vredefort dome and surrounding areas of the Witwatersrand basin. - Int. Workshop on Meteorite Impact on the Early Earth, Perth, Sept. 1990, Lunar and Planet. Inst., Huston, Contr.No. 746, pp.38-39.
- REIMOLD, W.U., JESSBERGER, E.K., STEPHAN, T. (1990c): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of pseudotachylite from the Vredefort Structure, South Africa. - Tectonophysics, 171, 139-152.
- REIMOLD, W.U., STEPHAN, T., JESSBERGER, E.K. (1990d): Testing ^{40}Ar - ^{39}Ar post-2 Ga ages for pseudotachylite from the Vredefort structure. - VII. Int. Conf. on Geochron., Cosmochron. and Isotop. Geol., Canberra, September 1990. Geol. Soc. Aust. Abstr., No. 27, p.82.
- SLAWSON, W.F. (1976): Vredefort core: a cross section of the upper crust? - Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 117-121.
- STANISTREET, I.G., MCCARTHY, T.S. (1991): Changing tectono-sedimentary scenarios relevant to the development of the Late Archaean Witwatersrand Basin. - Econ. Geol. Res. Unit, Univ. of the Witwatersrand, Inf.Circ. No. 233, 28pp.
- STEPTO, D. (1990): The geology and gravity field in the central core of the Vredefort structure. - Tectonophysics, 171, 75-103.
- WALRAVEN, F., ARMSTRONG, R.A., KRUGER, F.J. (1990): A chronostratigraphic framework for the north-central Kaapvaal craton, the Bushveld Complex and the Vredefort structure. - Tectonophysics, 171, 23-48.