

GEOFOKUS



Von den Frühstadien des Lebens zur Bildung der weltweit größten kristalen Goldanreicherungen

Hartwig E. Frimmel*

Zur Lösung des großen Rätsels in der Lagerstättenforschung

Seit über 6.000 Jahren wird Gold als der begehrteste metallische Rohstoff gewonnen. Nach wie vor wird für die Aufsuchung des gelben Edelmetalls mehr Geld ausgegeben als für jene irgendeines anderen metallischen Rohstoffs (9,7 Mrd. US\$ in 2012, 4,6 Mrd. US\$ in 2014). Gold kommt in einer Vielzahl von Lagerstättentypen vor, von denen orogene, oft an Scherzonen gebundene Lagerstätten und fossile Seifenlagerstätten mit jeweils rund 30 % der weltweit bekannten Menge (d.h. bisherige Produktion + Reserven + Ressourcen) die mit Abstand wichtigste Rolle spielen. Letztere liegen im Wesentlichen in der Form von Konglomerat-gebundenen Vererzungen des Witwatersrand-Typs vor, wobei die Typ-Provinz, das mesoarchaische Witwatersrand-Becken im südafrikanischen Kaapvaal-Kraton, alleine 32 % der bislang weltweit abgebauten Goldmenge lieferte. Die Genese von orogenen Goldlagerstätten ist weitgehend geklärt und wird auf den Aufstieg synorogener, metamorphogener, H_2O - CO_2 -reicher Fluide in mittlere Krustenabschnitte zurückgeführt, wobei die ultimative Quelle des Goldes bislang noch strittig geblieben ist. Im Gegensatz dazu war und ist die Genese der Goldlagerstätten des Witwatersrand-Typs höchst umstritten und gilt seit Jahrzehnten als eines der am intensivsten debattierten Probleme in der Lagerstättenforschung.

Seit einigen Jahren beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Geodynamik und Geomaterialforschung an der Universität Würzburg, zum Teil durch die DFG finanziell unterstützt, mit der Frage der Metallogenese von Witwatersrand-typischen Lagerstätten weltweit, aufbauend auf den zwei Jahrzehnte währenden Forschungsarbeiten des Lehrstuhlinhabers in Südafrika. Im letzten Jahr gelang ein großer Durch-

bruch insofern, dass nun ein genetisches Modell entwickelt werden konnte, welches allen der unzähligen existierenden Daten und Beobachtungen gerecht zu werden scheint. Gleichzeitig konnte erstmals eine Erklärung für die im Laufe der Erdgeschichte stark variierende Bildungsrate unterschiedlicher Goldvererzungstypen gefunden werden. Dieses neue Modell, das im Folgenden kurz vorgestellt werden soll, hat in den vergangenen Monaten für Aufsehen gesorgt, was in Pressemitteilungen und etlichen „keynote presentations“ sowie „invited papers“ in den führenden Publikationsorganen der Lagerstättenforschung (Frimmel 2014; Frimmel und Hennigh, 2015) mündete.

Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler machten sich zum einen die am Standort Würzburg verfügbare analytische Ausrüstung zu Nutze, in erster Linie Elektronenstrahl-Mikrosonde und Röntgenfluoreszenzspektrometer sowie in Zusammenarbeit mit dem dortigen Lehrstuhl für Röntgenmikroskopie modernste Geräte zur Mikro-Röntgenstrahl-Computertomographie (μ -CT); zum anderen wurde mit Partnern an den Universitäten von Clausthal, Erlangen, Frankfurt, Mannheim, Barcelona und Kapstadt, dem US Geological Survey sowie einer Reihe von Bergbau- und Explorationsfirmen in Südafrika, Brasilien, Kanada und Australien kooperiert.

Syngenetische versus epigenetische Mineralisation

Die wohl strittigste Frage im vergangenen Vierteljahrhundert waren der Zeitpunkt und die Prozesse, zu dem und durch die die großen Mengen an Gold in die konglomeratischen Wirtsgesteine des Witwatersrand-Beckens gelangten. Hierbei standen sich im Wesentlichen zwei konkurrierende Hypothesen gegenüber. Zum einen besteht die Vorstellung einer epigenetischen

Vererzung bedingt durch syntektonische Infiltration (metamorphogener) hydrothermaler Auhaltiger Fluide, analog zur Bildung orogener Goldlagerstätten; zum anderen die Vorstellung einer in erster Linie syndementären mechanischen Anreicherung von detritären Goldpartikeln zu Seifenlagerstätten (eine ausführliche Diskussion findet sich in Frimmel et al. 2005). Ein wesentliches Argument für ein Seifenmodell lieferte die von den Bergleuten seit über hundert Jahren in der täglichen Exploration genutzte hohe räumliche Korrelation zwischen Gold, sedimentären Strukturen und Lithofazies sowie der Mangel an diskordanten, den Schichtverband quer durchschlagenden Erzgängen. Dem gegenüber betonen die Anhänger eines epigenetischen Modells die Bindung der Vererzung an großräumige, beckenweite Alterationszonen sowie den Mangel an Goldnuggets und den Mangel einer plausiblen Quelle für die Unmengen von angeblich detritärem Gold.

Dabei besteht kein Zweifel, dass die mesoarchaischen Sedimente der Witwatersrand-Supergruppe im Laufe ihrer langen Geschichte mehrfach von schwachgradiger Metamorphose mit zum Teil metasomatischen Zügen erfasst worden sind. Der saure Charakter dieser Alteration hat jedoch, wie eine Reihe sediment-geochemischer Studien zeigte, wenig mit der beckenweiten Zirkulation saurer Erzfluide zu tun, wie von Hydrothermalisten postuliert, sondern mit metamorpher Überprägung von ursprünglich tiefgründig verwitterten Erosionsflächen, entlang derer z. B. detritäre Feldspatkörner weitestgehend kaolinitisiert wurden. Jeglicher Vergleich mit orogenen Goldlagerstätten hinkt insofern, dass die Geometrie der schichtgebundenen Erzkörper im Witwatersrand in starkem Kontrast zu den steil stehenden Gold-Quarzadern in synrogenen Systemen steht. Er hinkt aber auch hinsichtlich des Vererzungszeitpunktes. Im Kaapvaal-Kraton von Südafrika wie auch anderswo (z.B. dem Pilbara-Kraton in Westaustralien) finden sich auch Witwatersrand-typisch vererzte Konglomerate, die deutlich jünger sind als die letzte orogene Aktivität in der jeweiligen Region und z.T. als Basiskonglo-

merat auf postorogenen Einebnungsflächen vorliegen. Sie sind derzeit Explorationsziel und weisen lokal wirtschaftliche Goldgehalte auf. Der Mangel an Beobachtungen von Goldnuggets und Quarzgeröllen mit primären Goldeinschlüssen sowie insgesamt ein Massenbilanzproblem bei der Herleitung von rund 90.000 t Gold aus der Erosion von Gold-Quarzadern (oder welcher Form einer Goldvererzung im Liefergebiet auch immer) sind jedoch nicht von der Hand zu weisen und bildeten seit Jahrzehnten Grundlage für eine berechtigte Kritik am Paläoseifenmodell.

Schon frühzeitig wurde unter dem Mikroskop beobachtet, dass das Gold größtenteils in textuellen Positionen vorliegt, die eindeutig für eine postsedimentäre Ausfällung aus einer hydrothermalen Lösung sprechen. Diese Beobachtung alleine reicht jedoch nicht aus, um zwischen post-sedimentärer Infiltration eines Auerreichen Fluides über lange Strecken aus einer externen Quelle und lokaler Mobilisation von detritärem Gold innerhalb des konglomeratischen Wirtsgesteins zu unterscheiden. Als besonders hilfreich in dieser Frage entpuppte sich eine mittlerweile legendäre Gesteinsprobe, in der freies Gold als Schwermineralkonzentration die Kreuzschichtung an der Basis des 2,9 Ga (Giga-Jahre) alten Basal Reef im Welkom-Goldfeld definiert (siehe Titelbild). Schon vor über 20 Jahren konnten durch Auflösung des Gesteins in Flusssäure tausende Goldpartikel separiert und elektronenmikroskopisch dokumentiert werden (Minter et al. 1993). Dabei konnte gezeigt werden, dass etwa drei Viertel der Partikel gut gerundete, sphärisch bis scheibenförmige Mikronuggets darstellen, während das übrige Viertel aus fein verästelten, teils dendritischen, teils als Überwachsung auftretenden, eindeutig sekundären Formen besteht. Erstere wurden als detritäre Komponenten erklärt, letztere als Produkte sehr lokaler (d.h. im μ - bis mm-Bereich) post-sedimentärer Mobilisierung der detritären Goldkörner. Damit war die Grundlage für das genetische Modell von hydrothermal-modifiziertem Seifengold gelegt. Kritische Stimmen haben seither die Verlässlichkeit dieser Beobachtungen in Frage gestellt mit dem Verdacht, es könn-

te sich bei den Mikronuggets um Artefakte der Probenaufbereitung handeln. Moderne μ -CT-Technologie ermöglicht es mittlerweile, die Morphologie, Größe und Verteilung solcher Goldkörner zerstörungsfrei direkt im Gestein 3-dimensional zu dokumentieren. Entsprechende, jüngst durchgeführte Experimente zeigen eindeutig, dass es sich bei der Ansammlung von Goldpartikeln in dieser Probe tatsächlich um räumlich voneinander getrennte einzelne Mikronuggets handelt und nicht um Ausfällungsprodukte aus einem postsedimentär infiltrierten Fluid (Abb. 1). Ähnliche, in den letzten beiden Jahren durchgeführte Studien belegen diesen Sachverhalt auch für andere goldhaltige Konglomerate im Witwatersrand. Konglomerat-gebundene Goldanreicherung ist keineswegs auf das Witwatersrand-Becken beschränkt, sondern stellt einen Vererzungstyp dar, der aus beinahe allen Kratonen bekannt ist und sich in vielen siliziklastischen Abfolgen findet, die sich auf archaischem bis paläoproterozoischem Grundgebirge ablagerten. Die Mineralogie dieser Goldlagerstätten und -vorkommen ist weltweit erstaunlich ähnlich; beobachtete Unterschiede sind in erster Linie eine Funktion des Alters. Alle Beispiele, die älter als das „Great Oxidation Event“ (2,4 Ga) sind, zeichnen sich durch gerundeten Pyrit und Uraninit aus, jüngere durch detritäre Fe-Oxide an Stelle von Pyrit und einem Mangel an gerundetem Uraninit. Nur in den archaischen Beispielen konnten bislang stark an Gold angereicherte kohlige, im Wesentlichen aus Kerogen bestehende Lagen beobachtet werden.

Signifikante Unterschiede existieren in der Morphologie der Goldkörner in den jeweiligen Konglomeraten. Goldkörner mit Nugget-ähnlicher Morphologie konnten mittlerweile aus beinahe allen Witwatersrand-typischen Lagerstätten bzw. Vorkommen weltweit nachgewiesen werden. Konkrete Quellen für das detritäre Gold, seien es erodierte ältere orogene Gold-Quarzadern oder Seifenlagerstätten, sind für viele der Witwatersrand-typischen Vererzungen indiziert, die jünger als 2,8 Ga sind. Beispiele hierfür finden sich in den 2,7 Ga alten Fortescue-(Westaus-

tralien), 2,6 Ga Caraça, Jacobina (Brasilien) und 2,1 Ga alten Tarkwa (Ghana) Gruppen, der 1,8 Ga alten Roraima-Supergruppe (Guyana) sowie in den jüngeren Lagerstätten im Kaapvaal Kraton, konkret den 2,8 Ga alten Elsberg Reefs, dem 2,7 Ga alten Ventersdorp Contact Reef and dem 2,6 Ga alten Black Reef (Südafrika). Im Gegensatz dazu fehlen sowohl Befunde für richtige Nuggets als auch belastbare Indizien für eine konkrete Quelle für die Goldanreicherungen in den älteren, besonders goldreichen Konglomeraten des Witwatersrand-Beckens.

Unabhängig von den morphologischen Merkmalen liegt mittlerweile auch ein erheblicher Datensatz zur Chemie und isotopischen Zusammensetzung von Gold und anderen damit assoziierten kritischen Mineralphasen (z.B. Pyrit, Uraninit) vor. All diese Daten sprechen deutlich für eine detritäre Herkunft der gerundeten Gold-, Pyrit- und Uraninit-Partikel. So enthält beispielsweise das Witwatersrand-Gold um die 10 ppb Os, was Größenordnungen höher ist als die Os-Gehalte in jeglichem anderen bislang untersuchten Gold. Da Osmium eine extrem niedrige Löslichkeit im hydrothermalen Milieu besitzt, kann dieses Charakteristikum des Witwatersrand Goldes als Indiz gegen eine hydrothermale Herkunft gewertet werden. Bei Pyrit lässt sich eine Bandbreite von morphologischen, texturellen und letztlich auch chemisch zusammengesetzten Typen unterscheiden, die von detritären Typen unterschiedlicher Provenienz über synsedimentär gewachsene zu epigenetischen, hydrothermalen Typen reicht. Spurenelementuntersuchungen mittels LA-ICPMS haben in den letzten Jahren immer wieder gezeigt, dass gerade der synsedimentäre, konzentrisch laminierte Pyrit besonders reich an Au ist. In ähnlicher Weise kommen auch gerundete und sekundär mobilisierte U-Minerale vor, in erster Linie Uraninit. Auch für diese kritische Phase konnte auf Grund ihres Chemismus (hohe Th- und SEE-Gehalte, variable Provenienz-indikative Ta/Nb-Verhältnisse) ein detritärer Ursprung belegt werden.

Während also eine synsedimentäre Goldanreicherung in den letzten Jahren gut belegt werden konnte, blieb die Frage der Herkunft all dieses

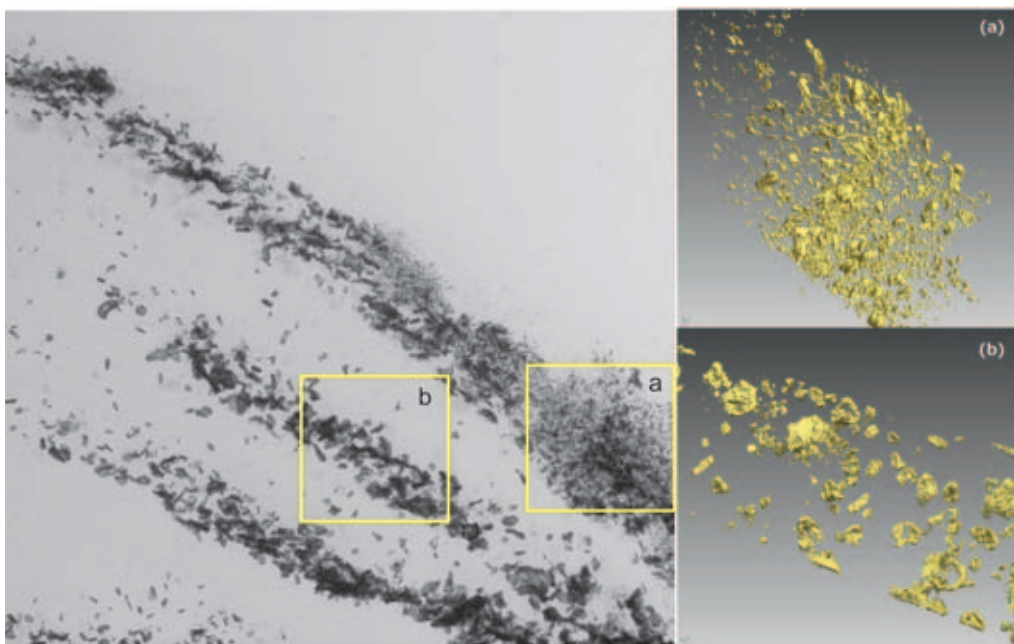
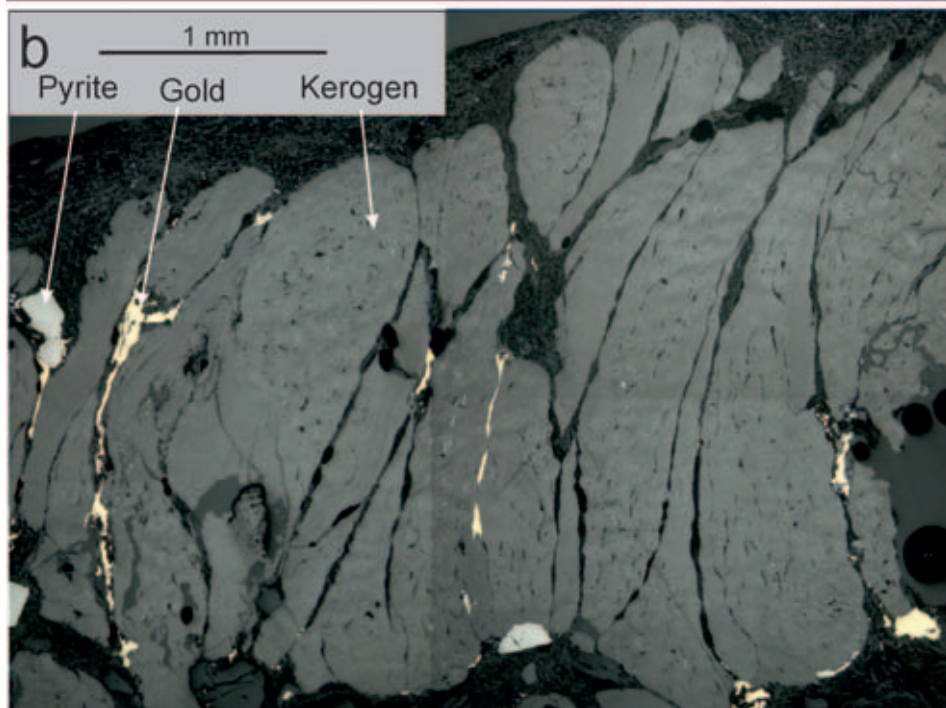
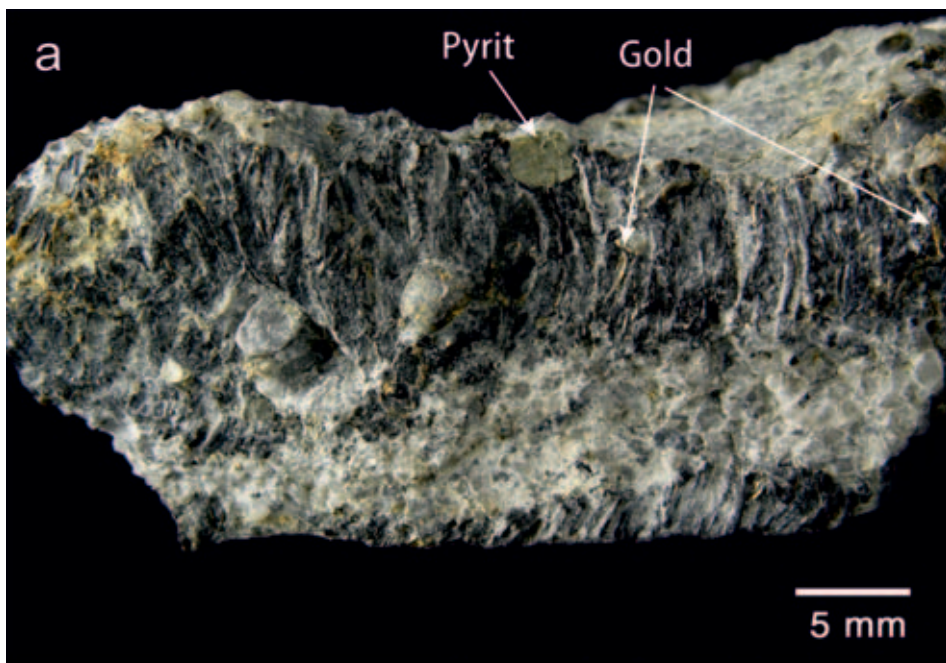


Abb. 1: μ -CT Radiograph einer kreuzgeschichteten goldreichen Probe (siehe Titelbild) von der Basis des Basal Reef, Welkomgoldfeld, Witwatersrand (Bildbreite: 1 cm); sichtbar ist die Verteilung von Goldpartikeln entlang der Schichtflächen mit 3-D Vergrößerungen von zwei Domänen: (a) Bereich mit lokal remobilisiertem Gold, (b) Bereich mit ausschließlich voneinander isolierten, unterschiedlich deformierten Mikronuggets, die offensichtlich detritär sind (Bildbreite jeweils 4 mm).

detritären Goldes unbeantwortet. Keine der typischen Quellen, wie sie für jüngere oder gar rezente Seifengoldvorkommen herangezogen werden, kann die gigantische Menge von Gold in den archaischen Konglomeraten erklären. Erst ein Abrücken von herkömmlichen, größtenteils aktualistischen Vorstellungen, eine Neuinterpretation von kohligen Substanzen in den goldführenden Gesteinen des Witwatersrand und letztlich ein in den letzten Jahren erzielter erheblicher Kenntnissgewinn zur Entwicklung des Lebens ermöglichte es, den lange ersehnten Durchbruch zu erzielen. Dabei zeigte sich, dass die erste, und mit Abstand größte Anreicherung von Gold in der Erdkruste unmittelbar an Veränderungen in der archaischen Atmo-, Hydro- und Biosphäre gekoppelt war.

Photosynthese und die große Goldfalle

Schon kurz nach Entstehung des Lebens (mit anfänglich wohl heterotrophen Zellen) entwickelten sich im Paläoarchaikum autotrophe Stoffwechselwege, zum einen als chemoautotrophe Stoffwechsel, zum anderen als anoxygene Photosynthese, bei der vermutlich H_2 zur Erzeugung energiereicher organischer Verbindungen durch Einwirkung von Lichtenergie genutzt wurde. Daran schloss sich eine Übergangsphase zur energetisch wirksameren oxygenen Photosynthese an, bei der H_2O als Elektronenspender genutzt wird. Wann dieser Übergang stattgefunden hat, ist nach wie vor unklar, aber jüngste Studien, zusammengefasst von Lyons et al. (2014), deuten darauf hin, dass erste oxygene



◀ **Abb. 2:** (a) Handstück mit Gold-reicher Kerogenlage von der Basis des Vaal Reef, Stilfontein Mine, Klerksdorp-Goldfeld, Witwatersrand; (b) auflichtmikroskopische Aufnahme einer Kerogenlage mit stromatolithenähnlicher Mikrostruktur und dünnen Goldplättchen auf ehemaligen Wachstumsoberflächen, vermutlich von Cyanobakterien; Basis des Carbon Leader Reefs, West Driefontein Mine, Carletonville Goldfeld, Witwatersrand.

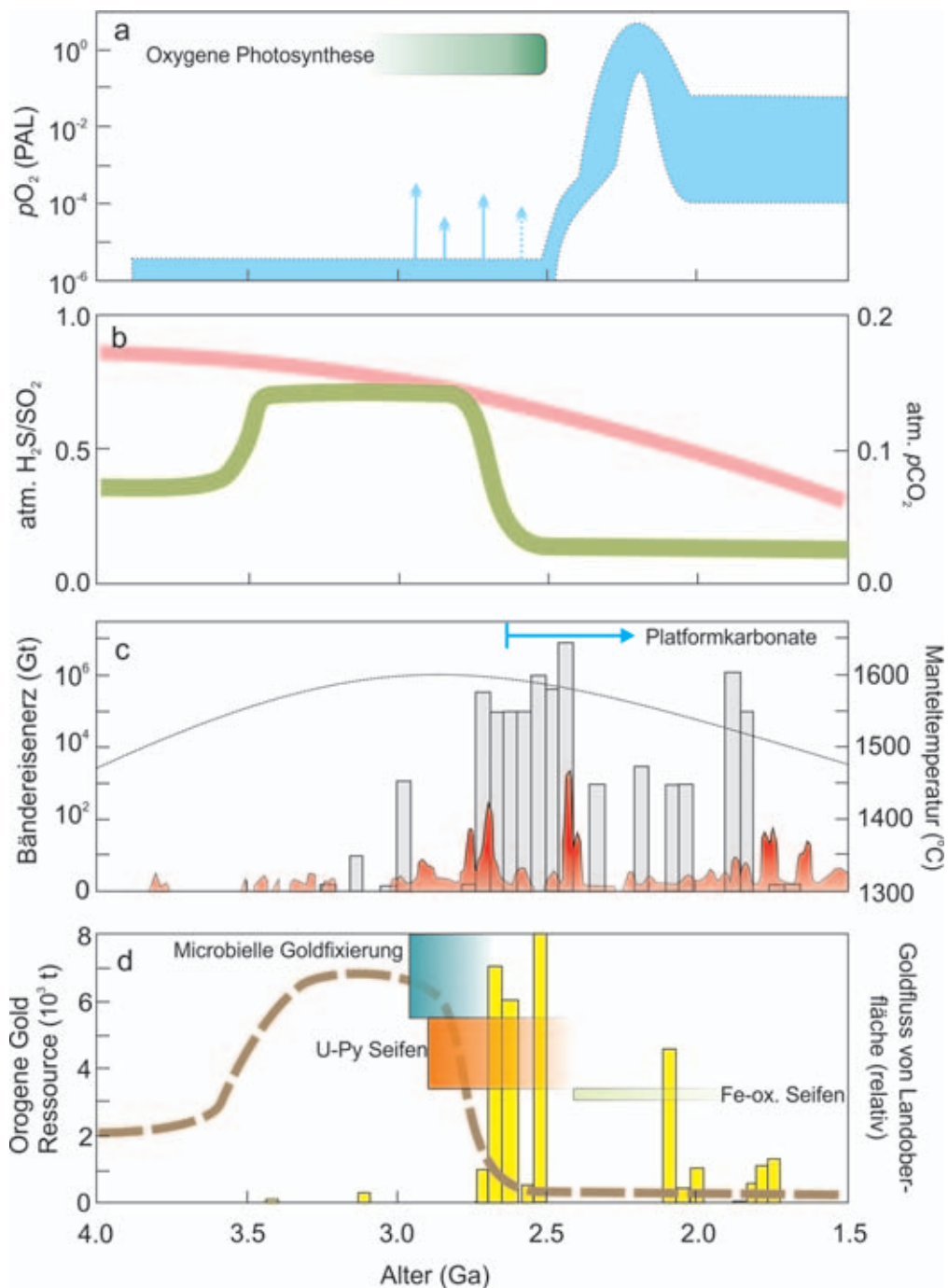
Photosynthese schon einige hunderte Millionen Jahre vor dem „Great Oxidation Event“ (ca. 2,4 Ga) stattgefunden hat, vermutlich schon vor 3 Ga.

Relikte mesoarchaischer Mikroben sind in Form von kohligem, im Wesentlichen aus Kerogen bestehenden Lagen in einigen stratigraphischen Positionen in der Central Rand Gruppe der Witwatersrand Supergruppe erhalten. Diese Millimeter bis einige Zentimeter mächtigen Lagen finden sich typischerweise auf alten Erosionsflächen und waren genauso Gegenstand einer syngenetischen versus epigenetischen Herkunftsdebatte wie die anderen damit verbundenen Erzphasen Gold, Pyrit und Uraninit. Obwohl etliche Bearbeiter in Analogie zu ebenfalls weit verbreitetem, zweifelsfrei hydrothermalem Pyrobitumen in den Witwatersrand Metasedimentgesteinen auch diese kohligem Lagen als hydrothermale Bildungen interpretierten, bezeugen hervorragende erhaltene sedimentäre Strukturen und Texturen, dass es sich hierbei um In-situ-Reste von mikrobiellen Matten handelt, also um Kerogen (Frimmel & Hennigh 2015). Dies wird noch weiter unterstützt durch bestehende organisch-chemische Daten und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte für die einzelnen organischen Komponenten sowie durch Hinweise auf die sedimentäre Wiederaufarbeitung der biogenen Matten in Form von entsprechenden Klasten in fluviatilen Konglomeraten, welche die Paläooberfläche mit den kohligem Lagen durchschneiden.

Die Altersstellung dieser kohligem Lagen vor ca. 2,9 Ga und deren organisch-chemischen Charakteristika deuten stark darauf hin, dass es sich hierbei um Zeugen des Übergangs von anoxygener zu oxygener Photosynthese handelt. Die metallogenetische Bedeutung dieser kerogenreichen Lagen liegt darin, dass sie lokal extrem an Gold angereichert sein können (Abb. 2). In

manchen der reichen Witwatersrand-Erzkörper, wie z. B. dem B-Reef im Welkom-Goldfeld, sollen bis zu 70 % des Goldes an solche Kerogenlagen gebunden gewesen sein. Andere Schätzungen gehen davon aus, dass rund 40 % des gesamten Witwatersrand-Goldes in den Kerogenlagen vorkamen bzw. vorkommen. Damit stellen diese Relikte mikrobieller Kolonien die älteste und gleichzeitig reichste Goldfalle im Lauf der Erdgeschichte dar.

Goldausfällung auf der Oberfläche erster O_2 -produzierender Mikroben, vermutlich Cyanobakterien, erklärt sich nahtlos aus unserem heutigen Verständnis der archaischen Umweltbedingungen (Abb. 3). Die mesoarchaische Atmosphäre war so gut wie frei von O_2 und angereichert an den Treibhausgasen CH_4 und CO_2 , welche dem kühlenden Effekt einer deutlich schwächeren Sonne zu jener Zeit entgegen wirkten. Hinzu kamen erhöhte SO_2 - und H_2S -Konzentrationen durch vulkanische Entgasung, wobei das $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ -Verhältnis im Wesentlichen durch das Verhältnis von submarinem zu subaerischem Vulkanismus bedingt war. Regen zu jener Zeit war sauer ($\text{pH} \sim 4$) und bewirkte tiefgründige chemische Verwitterung. Die dabei vorherrschende Alteration von Feldspat zu Kaolinit verbrauchte H^+ und folglich wurde der pH des korrespondierenden Oberflächen- bzw. Flusswassers auf etwa 6 gepuffert. Der in mesoarchaischen fluviatilen Ablagerungen allgegenwärtige Pyrit belegt erhöhte H_2S Gehalte. Unter solchen Bedingungen erreicht Gold seine maximale Löslichkeit als Sulfidkomplex (Heinrich 2015). Folglich muss eine enorme Menge an Gold, herausgelöst aus mesoarchaischer Kruste, über Flusswasser in Richtung archaischer Ozean transportiert worden sind. Wo immer auch diese Au-reichen meteorischen Wässer und flachmarines Meerwasser auf Cyanobakterien-Kolo-



◀ **Abb. 3:** Die wichtigsten Stadien der Goldkonzentrationsarten im Vergleich zur Entwicklung der Zusammensetzung der Atmosphäre und der zeitlichen Verteilung von Bändereisenerzen während des Archaikums und Paläoproterozoikums: (a) Entwicklung des atmosphärischen Sauerstoffgehalts relativ zum heutigen Wert (PAL); blaue Pfeile deuten ersten „Hauch“ von Sauerstoff von ersten oxygenen photosynthetisierenden Mikroben an; (b) Entwicklung des atmosphärischen H_2S/SO_2 und pCO_2 (rosa); (c) zeitliche Verteilung mariner Bändereisenerze im Vergleich zu Manteldiapiren (rot) sowie der Entwicklung der Manteltemperatur; (d) Zeitliche Verteilung von orogenen Goldlagerstätten sowie Hauptphasen von mikrobieller Goldkonzentration, Ablagerung von detritärem Seifengold zusammen mit Uraninit und Pyrit sowie mit Fe-Oxiden; ebenso angedeutet ist die Veränderung im Goldfluss von der alten Landoberfläche (braune Kurve); aus Frimmel & Hennigh (2015).

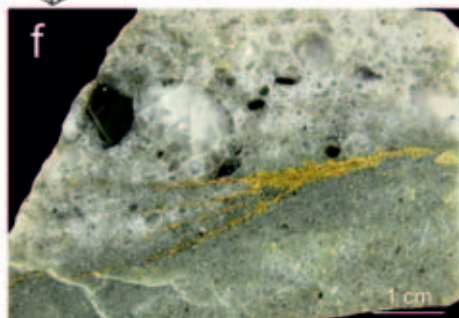
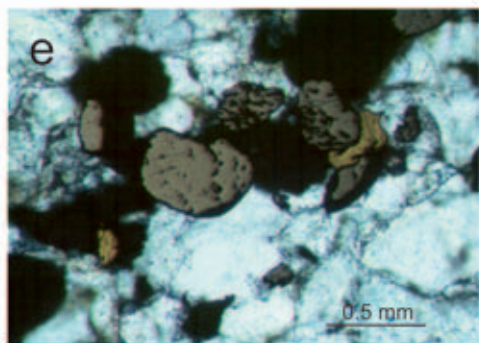
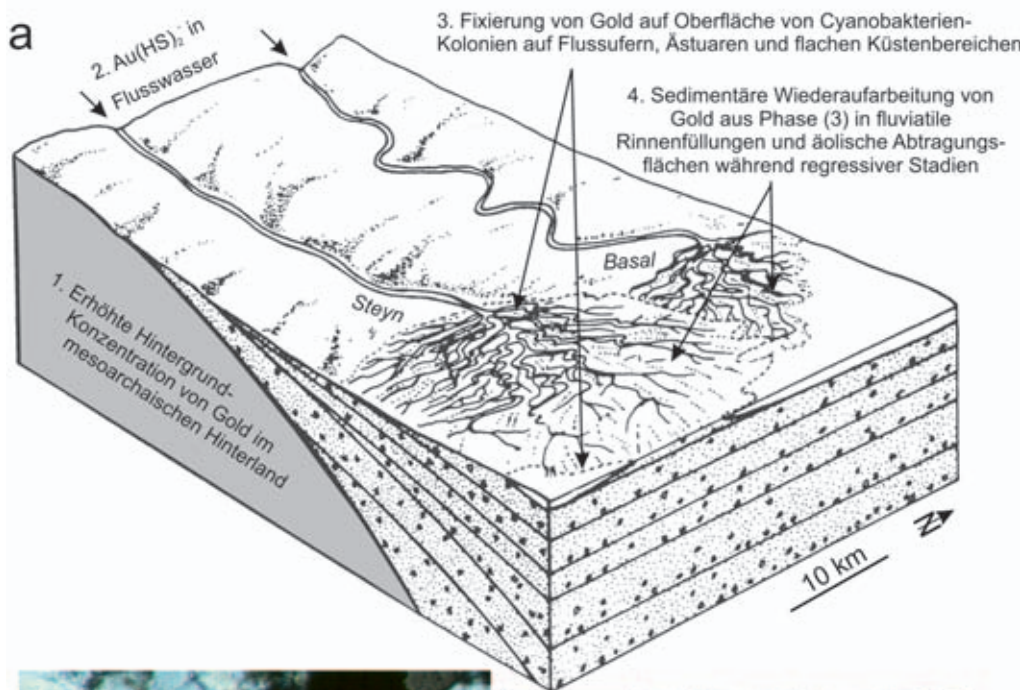
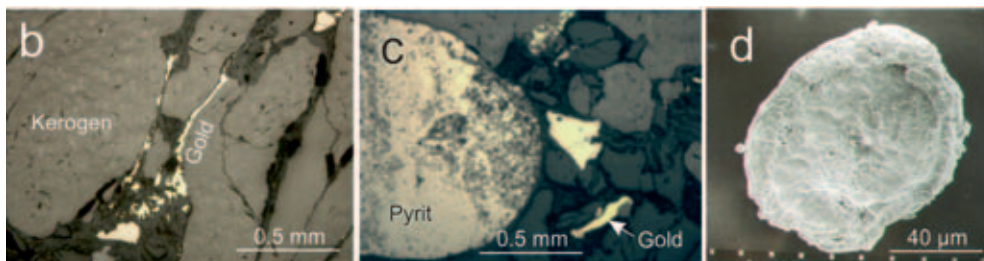
nien stießen, in erster Linie in küstennahen Bereichen und Delta-Feuchtgebieten, musste es auf der Oberfläche der photosynthetisierenden Mikroben zur Ausfällung von Gold gekommen sein. Thermodynamisch lässt sich modellieren, dass schon eine geringe Menge von O_2 die Löslichkeit der Au-Sulfid-Komplexe um Größenordnungen verringert (Heinrich 2015). Die Oberfläche der Cyanobakterien-Matten war durch die Produktion von O_2 in einer ansonsten O_2 -freien Welt gekennzeichnet und damit der prädestinierte Ort für die Ausfällung des gelben Metalls. Die lokal an Gold angereicherten Mikrobenkolonien waren sicherlich sehr delikate Strukturen mit sehr niedrigem Erhaltungspotential. Regression im Küstenbereich oder Überflutung von Feuchtgebieten entlang von Flussufern muss zwangsläufig zur fluviatilen Wiederaufarbeitung der z.T. goldreichen Mikrobenmatten in grobkörnigere fluviatile Ablagerungen, wie konglomeratische Rinnenfüllungen, geführt haben (Abb. 4). Dadurch erklären sich viele der rundlichen Mikronuggets, die aus etlichen Witwatersrand Reefs beschrieben worden sind (Minter et al. 1993). Andernorts, auf äolischen Deflationsflächen, trockneten die Mikrobenkolonien wohl aus und wurden vom Wind verweht. Dadurch wären die delikatsten Goldplättchen freigelegt und durch Wind weiter bewegt worden. Eine typische Form äolisch transportierter Goldpartikel sind Toroide – scheibenförmige Partikel mit einem kreisförmigen Ring, der durch das immer wiederkehrende Umbiegen des ausgedünnten Randes entsteht. Solche Formen sind beispiels-

weise im *Basal Reef* äußerst häufig (Abb. 4d) und fügen sich dort gut in den sedimentologischen Befund für eine äolische Deflationsfläche ein (Minter et al. 1993).

Der hohe Goldfluss von der archaischen Landoberfläche wird zwangsläufig auch zu erhöhter Goldkonzentration im archaischen Ozean geführt haben, sodass auch dieser als ausgesprochen voluminöses Reservoir für mikrobielle Goldanreicherung in Küstennähe in Frage kommt. Hinweise darauf liefern erhöhte Goldgehalte in archaischen Bändereisenerzen vom Algoma-Typ. Siliziklastische Ablagerungen aus tiefmarinen Bereichen weisen hingegen keine signifikant erhöhten Goldgehalte auf, was vielleicht auf den Mangel an photosynthetisierenden planktonischen Mikroben im archaischen Ozean zurückgeführt werden kann.

Von den Anfängen des krustalen Goldkreislaufs

Eine Analyse der weltweit bekannten Goldlagerstätten unterschiedlichsten genetischen Typus zeigt, dass die Bildungsrate bestimmter Goldlagerstättentypen keineswegs über die Erdgeschichte hinweg einheitlich war, sondern episodisch, mit beispielsweise einem Höhepunkt in der orogenen Goldlagerstättenbildung im Nearchaikum. Ähnlich wie für andere metallische Rohstoffe, wie z. B. Eisen und Mangan, kann nun auch für Gold diese Episodizität durch ein Wechselspiel zwischen Krustenbildung, Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre und Entwicklung des Lebens erklärt werden (Abb. 3). In



◀ **Abb. 4:** (a) Schematisches Blockdiagramm, welches das vermutliche Ablagerungsmilieu goldführender Konglomerate am Beispiel des Steyn und Basal Reef im Welkom-Goldfeld illustriert und die vier grundlegenden Stadien in der Bildung der Witwatersrand Goldlagerstätten aufzeigt; **b – d** Fotos zur Illustration der unterschiedlichen Stadien sedimentärer Aufarbeitung von mikrobiell gebundenem Gold zu Seifengold: **b** Goldplättchen auf Oberfläche von Kerogen mit stromatolithähnlicher Mikrostruktur, Vaal Reef; **c** Detritäres Gold mit überfaltetem Rand in Konglomerat unmittelbar neben Kerogen-Lage; **d** SEM Aufnahme von detritärem Gold-Mikronugget mit überfaltetem Rand, Basal Reef; **e** In-situ-detritäres Goldpartikel mit überfaltetem Rand (Pfeil) zwischen detritären Pyritkörnern (Py) im Basal Reef, unter kombiniertem Durch- und Auflicht; **f** Goldkonzentration entlang Kreuzschichtung (siehe Titelbild), Basal Reef, Free State Geduld-Mine, Welkom-Goldfeld.

der Zeit vor 3 Ga kam es kaum zu größeren Goldanreicherungen in der Erdkruste. Um ca. 2,9 Ga änderte sich diese Situation drastisch mit der Ausfällung von großen Mengen an Gold auf der Oberfläche erster Cyanobakterien-Kolonien in küstennahen Randbereichen mesoarchaischer Kontinente. Rund 13 % der bekannten Menge an bislang abgebautem und als Ressource zur Verfügung stehendem Gold war bzw. ist in noch heute erhaltenen Resten dieser frühen mikrobiellen Matten, im Wesentlichen im Witwatersrand, vorhanden. Der tatsächliche Anteil an mikrobiell gebundenem, ca. 2,9 Ga altem Gold lag sicherlich weitaus höher, vermutlich bei über 80 %, und spiegelt somit das Gold-Megaevent der Erdgeschichte schlechthin wider. Der größte Teil davon wurde jedoch rasch durch Erosion und Umlagerung zu Seifengoldlagerstätten, später durch krustales Recycling in orogene und andere hydrothermale Lagerstättentypen zerstört. Mikrobielle Goldfixierung entlang mesoarchaischer Küstenregionen war vermutlich ein globales Phänomen, der Erhalt der entsprechenden delikaten kohligen Lagen jedoch nur unter besonderen geologischen Umständen, wie in zentralen, seit langer Zeit nicht mehr von orogener Aktivität erfassten Bereichen alter Kratone möglich (mit dem Witwatersrand-Becken inmitten des Kaapvaalkratons als herausragendes Beispiel).

Das Potential für die Bildung reicher Goldseifenlagerstätten war im späten Mesoarchaikum und Neoarchaikum am höchsten, da zu der Zeit die primären, mikrobiellen Goldvererzungen noch

am ehesten als Quelle für das detritäre Gold zur Verfügung standen. Frühe Erosion der goldreichen Cyanobakterien-Kolonien führte zur Bildung erster, sehr reicher Seifengoldansammlungen, die teils durch weitere sedimentäre Wiederaufarbeitung zu noch weiteren reichen Seifenlagerstätten vor 2,9 bis 2,7 Ga führten. Beispiele hierfür sind vom Kaapvaal Craton, dem São-Francisco-Kraton und dem Pilbara-Kraton gut belegt.

Mit etwa 200-400 Mio. Jahren Verzögerung, was in etwa der Dauer eines Wilson-Zyklus entspricht, gelangte ein erheblicher Anteil der ersten 2,9 Ga alten goldreichen Sedimente durch tektonische Prozesse auch in tiefe Krustenabschnitte und den obersten Erdmantel. Aus der metamorphen Überprägung dieser Sedimente resultierten orogene Goldlagerstätten. Zu keiner anderen Zeit wurde so viel orogenes Gold geformt wie im Neoarchaikum (Groves et al. 2005) – ein Phänomen, welches sich nun durch die primäre Goldanreicherung in den von Orogenese erfassten Sedimentgesteinen, vor allem um 2,9–2,7 Ga, erklären lässt.

Im Paläoproterozoikum waren etliche der vorher gebildeten orogenen Goldlagerstätten bereits wieder durch Erosion freigelegt und standen somit selbst als Quelle für weitere Seifenlagerstätten zur Verfügung. Beispiele hierfür kennen wir aus der Huronian-Supergruppe in der Superior-Provinz von Kanada, dem São Francisco-Kraton oder dem Amazon-Sao Luis und Westafrikanischen Kraton. Die Mengen an darin gebundenem Gold sind jedoch um Größenordnungen ge-

ringer, denn diese Seifenlagerstätten bezogen ihr detritäres Gold aus räumlich isolierten Punktquellen, d.h. erodierten (u.a. orogenen) Goldlagerstätten, und nicht mehr aus flächenhaft verteilten Gold-reichen Sedimenten, wie dies im Meso- und Nearchaikum der Fall gewesen sein dürfte. Letztere waren im Paläoproterozoikum längst erodiert, durch jüngere Schichten überdeckt oder durch tektonische Prozesse in größere Tiefen versenkt und metamorph überprägt.

Nach dem „Great Oxidation Event“ um 2,4 Ga war eine weitere Bildung von mikrobiell fixierten Goldkonzentrationen so gut wie ausgeschlossen. Der Chemismus von meteorischen Wässern hatte sich zu jener Zeit bereits so sehr verändert, dass ein erhöhter Goldtransport von der alten Landoberfläche über Flusswasser de facto nicht mehr möglich war. Die Verfügbarkeit von alten Seifenlagerstätten als Quelle für die Neubildung von jüngeren Seifenlagerstätten nahm sukzessive ab und versiegte schließlich vor 1,8 Ga so gut wie völlig. Auch das Meerwasser änderte seine Zusammensetzung im Übergang von Archaikum zu Proterozoikum, was sich u.a. in einem erhöhten $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ Verhältnis und der erstmaligen Bildung von ausgedehnten Karbonatplattformen und einer damit einhergehenden Zunahme im pH-Wert ausdrückte. Damit stand Meerwasser als Quelle für mikrobiell fixierte Goldanreicherungen de facto nicht mehr zur Verfügung.

Im weiteren Verlauf des Proterozoikums und schließlich des Phanerozoikums wurden die bestehenden archaischen bis paläoproterozoischen krustalen Goldanreicherungen immer wieder durch plattentektonische Prozesse aufgearbeitet, metamorph überprägt und z.T. in den oberen Mantel rückgeführt. Der Aufstieg daraus resultierender Au-reicher Fluide und Schmelzen und die Ausfällung von Gold daraus in unterschiedlichen Krustenniveaus führte schließlich zur bekannten Vielzahl von Goldvererzungstypen, sei es orogenes Gold in mittleren Krustentiefen, porphyrische (Cu-)Au Lagerstätten in seichteren Niveaus oder epithermale Lagerstätten nahe/an der Erdoberfläche. Gold-

mobilisierung in all diesen Prozessen involvierte $\text{H}_2\text{O}\text{-CO}_2$ -reiche Fluide, in denen Osmium eine extrem niedrige Löslichkeit aufweist. Es ist also nicht verwunderlich, dass Gold von all diesen Lagerstättentypen extrem niedrige Osmiumgehalte aufweist, oft unterhalb der analytischen Nachweisgrenzen im ppt-Bereich. Die rund 1000-fach höheren Osmium-Konzentrationen im Witwatersrand-Gold belegen deutlich, dass letzteres nie am krustalen Goldkreislauf beteiligt war und somit in der Tat als Zeuge der ersten krustalen Goldanreicherungen herangezogen werden kann.

Wirtschaftsgeologische Konsequenzen

Die hier kurz zusammengefassten Forschungsergebnisse sind von weitreichender Bedeutung für die globale Exploration nach weiteren Lagerstätten des begehrten Edelmetalls. Die Überwindung der letzten Hürden für die Plausibilität eines syngenetischen Modells für den weltweit wichtigsten Goldvererzungstyp – konglomeratgebundene Lagerstätten des Witwatersrand-Typs – schließen eine Reihe von geologischen Einheiten für die weitere Exploration nach diesem Vererzungstyp aus, insbesondere jüngere, d.h. solche mesoproterozoischen bis phanerozoischen Alters. Als besonders vielversprechend können mesoarchaisch bis paläoproterozoische Sedimentbeckenfüllungen bewertet werden, die ein paläo- bis mesoarchaisches Hinterland aufweisen, fluvio-deltaische bis littorale Sedimente und möglichst viele Winkeldiskordanzen beinhalten, und die von postsedimentärer Erosion und tektonischer Überprägung geschützt blieben.

Ob die räumliche Nähe der weltweit bei weitem größten Ansammlung von Gold und Platingruppenelementen (also den stark siderophilen Elementen) im südafrikanischen Witwatersrand-Becken beziehungsweise im Bushveld-Komplex bloßer Zufall ist, mag in Frage gestellt werden. Es ist nicht ausgeschlossen, dass die Quellbereiche im Mantel, aus denen die Krustengesteine des Kaapvaal Kratons resultierten, an stark siderophilen Elementen angereichert waren. Dies könnte zum einen auf endogenen

Ursachen, wie unvollständige Kern-Mantel-Separierung, zum anderen auf exogenen Ursachen, wie Kontamination durch schweres Meteoroiden-Bombardement, beruhen. Für zukünftige globale Explorationsstrategien wird es daher nützlich sein, zu klären, inwieweit der Kaapvaal, und der damit vermutlich ursprünglich verbundene Pilbara-Kraton, eine Sonderstellung einnehmen, in dem sie aus von vornherein bereits an siderophilen Elementen angereicherter Kruste bestanden bzw. bestehen. Ein neues Forschungsprojekt, welches genau dieser Fragestellung nachgehen soll, wurde kürzlich am Lehrstuhl für Geodynamik und Geomaterialforschung an der Universität Würzburg in Zusammenarbeit mit der südafrikanischen National Research Foundation und dortigen Bergbauunternehmen auf den Weg gebracht.

Literatur

Frimmel, H.E., Groves, D.I., Kirk, J., Ruiz, J., Chesley, J., Minter, W.E.L. (2005): *The formation and preservation of the Witwatersrand gold-fields, the largest gold province in the world.* - In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.) *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado: 769-797.*

Frimmel, H.E. (2014): *A giant Mesoarchean crustal gold-enrichment episode: Possible causes and consequences for exploration.* - In: Kelley, K., Golden, H.C. (Eds.) *Society of Economic Geologists, Special Publication 18: 209-234.*

Frimmel, H.E., Hennigh, Q. (2015): *First whiffs of atmospheric oxygen triggered onset of crustal gold cycle.* - *Mineralium Deposita 50: 5-23.*

Groves, D.I., Condie, K.C., Goldfarb, R.J., Hronsky, J.M.A., Vielreicher, R.M. (2005): *Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits.* - *Economic Geology 100: 203-224.*

Heinrich, C.A. (2015): *Witwatersrand gold deposits formed by volcanic rain, anoxic rivers and Archaean life.* - *Nature Geoscience 8: 206-209.*

Lyons, T.W., Reinhard, C.T., Planavsky, N.J. (2014): *The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere.* - *Nature 506: 307-315.*

Minter, W.E.L., Goedhart, M.L., Knight, J., Frimmel, H.E. (1993): *Morphology of Witwatersrand gold grains from the Basal Reef: Evidence for their detrital origin.* - *Economic Geology 88: 237-248.*

* Lehrstuhl für Geodynamik und Geomaterialforschung, Institut für Geographie und Geologie, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

Impressum

© GMIT – Geowissenschaftliche Mitteilungen
Heft 62, Dezember 2015

GMIT ist ein deutschsprachiges Nachrichtenorgan und dient dem Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler (BDG), der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologischen Vereinigung (DGGV), der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGGV) der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG), der Deutschen Quartärvereinigung (DEUQUA), der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe (DTTG), dem Oberrheinischen Geologischen Verein (OGV) und der Paläontologischen Gesellschaft (PalGes) als Nachrichtenorgan. Die Zeitschrift ist für die Mitglieder der genannten Gesellschaften bestimmt. Der Bezug des Heftes ist im Mitgliedsbeitrag enthalten.

Herausgeber: ARGE GMIT c/o BDG-Bildungsakademie, Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn

Satz und Layout: Dipl.-Geol. U. Wutzke

Auflage: 9.500 · ISSN: 1616-3931

Redaktion: Klaus-Dieter Grevel (DMG; klaus-dieter.grevel@rub.de; *kdg.*), Michael Grinat (DGG; michael.grinat@liag-hannover.de; *mg.*), Sabine Heim (DGGV; sabine.heim@rwth-aachen.de; *sh.*), Christian Hoselmann (DEUQUA; christian.hoselmann@hlug.hessen.de; *ch.*), Reinhard Kleeberg (DTTG; kleeberg@mineral.tu-freiberg.de; *rk.*) Hermann Rudolf Kudraß (DGGV; kudrass@gmx.de; *hrk.*), Jan-Michael Lange (DGGV; jan-michael.geolange@uni-leipzig.de; *jml.*), Alexander Nützel (PalGes; a.nuetzel@lrz.uni-muenchen.de; *an.*), Birgit Terhorst (DEUQUA; birgit.terhorst@uni-wuerzburg.de; *bt.*), Eckhard Villinger (OGV; eckhard.villinger@t-online.de; *ev.*), Hans-Jürgen Weyer (BDG; BDG@geoberuf.de; *hju.*), Ulrich Wutzke (*uw.*).

Die Redaktion macht darauf aufmerksam, dass die unter einem Namen oder einem Namenszeichen erscheinenden Artikel persönliche Meinungen und Ansichten enthalten können, die nicht mit der Meinung und Ansicht der Herausgeber übereinstimmen müssen. Für den Inhalt der Artikel sind die Autoren verantwortlich. Die Autoren erklären gegenüber der Redaktion, dass sie über die Vervielfältigungsrechte aller ihrer Fotos und Illustrationen verfügen und übertragen diese sowohl für die Print- wie für die Online-Ausgabe an GMIT.

Bitte senden Sie Beiträge – am besten per E-Mail mit angehängten Windows-lesbaren Formaten – nur an einen der GMIT-Redakteure (Adressen in diesem Heft). Textbeiträge sind deutschsprachig. Beachten Sie bitte die Autorenhinweise, die in diesem Heft publiziert sind.

Einsender erklären sich mit der redaktionellen Bearbeitung und eventuellen Kürzung ihrer Zuschrift einverstanden und treten die Rechte an die Herausgeber ab. Für unverlangt eingereichte Einsendungen übernimmt die Redaktion keine Verantwortung. Eingesandte Fotos und sonstige Unterlagen werden nur auf ausdrücklichen Wunsch zurückgesendet.

Angaben zu Preisen, Terminen usw. erfolgen ohne Gewähr.

GMIT Nr. 63 erscheint im März 2016. Redaktionsschluss ist der 15. Januar 2016. Anzeigenschluss ist der 30. Januar 2016. Auskunft erteilt die BDG-Geschäftsstelle, Lessenicher Straße 1, 53123 Bonn; Tel.: 0228/696601, Fax: 0228/696603; E-Mail: BDG@geoberuf.de; Internet: www.geoberuf.de.

Personenbezogene Angaben der Mitglieder werden zum Zwecke der Mitgliederverwaltung und des Versandes von GMIT gespeichert. Die Datei zum Versand von GMIT wurde aus verschiedenen Einzeldateien zusammengesetzt. Bei unterschiedlicher Schreibweise oder verschiedenen Anschriften (z.B. Dienst- und Privatanschrift) kann es vorkommen, dass ein Mitglied das Heft doppelt erhält. Für entsprechende Hinweise ist die Redaktion dankbar. Die Redaktion dankt den Inserenten und bittet die Leser, diese zu berücksichtigen.