

22

47,867

Titan

Ti

*Informationen zur
Nachhaltigkeit*



Impressum

Herausgeberin:

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe
Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit
Stilleweg 2
30655 Hannover

Autorin:

Marie Gentzmann

unter Mitarbeit von:

Harald Elsner, Malte Drobe, Gudrun Franken, Evelyn Schnauder

Kontakt:

Malte Drobe
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Malte.Drobe@bgr.de

Satz: Jolante Duba

Stand: September 2023
DOI: 10.25928/ra7w-jr21

Inhalt

Auf ein Blick	3
1 Relevanz von Titan	4
2 Von der Lagerstätte zum Rohstoff	4
3 Recycling	10
4 Nachhaltigkeitsaspekte des Bergbaus	11
6 Quellennachweis	21

Auf einen Blick

- Titan wird aus den Mineralen Ilmenit, Leukoxen und Rutil gewonnen, die in zwei verschiedenen Lagerstättentypen vorkommen: in Festgestein oder in Schwermineralsanden.
- Schwermineralsande werden häufig in der Nähe der Küste abgebaut. Dies kann mit Risiken für die Umwelt verbunden sein, wie etwa erhöhte Erosion und Verlust der Schutzfunktion von Dünsystemen sowie Verlust der Biodiversität im marinen Bereich und nahe der Küste.
- Der Abbau auch Schwermineralsanden hat zudem einen verhältnismäßig hohen Flächenbedarf. Konfliktpotenzial entsteht durch Landnutzungskonflikte und Umsiedlung, sowie der Befürchtung, dass umgebende Gewässer sowie Fischfanggebiete von Verschmutzung betroffen sein können.
- Bedeutende Abbauländer für Schwermineralsande sind Mosambik, Madagaskar, Sierra Leone und Kenia, die in die Kategorie der Länder mit schwacher Governance fallen. Der Abbau in Festgestein findet in Ländern mit mittlerer (China) bis sehr guter Governance (Kanada und Norwegen) statt.
- Zu den wichtigsten weiterverarbeitenden Ländern gehören China, die USA, Deutschland, Japan, Großbritannien, Mexiko und Australien. Die Weiterverarbeitung ist grundsätzlich weitaus energieintensiver als der Abbau.

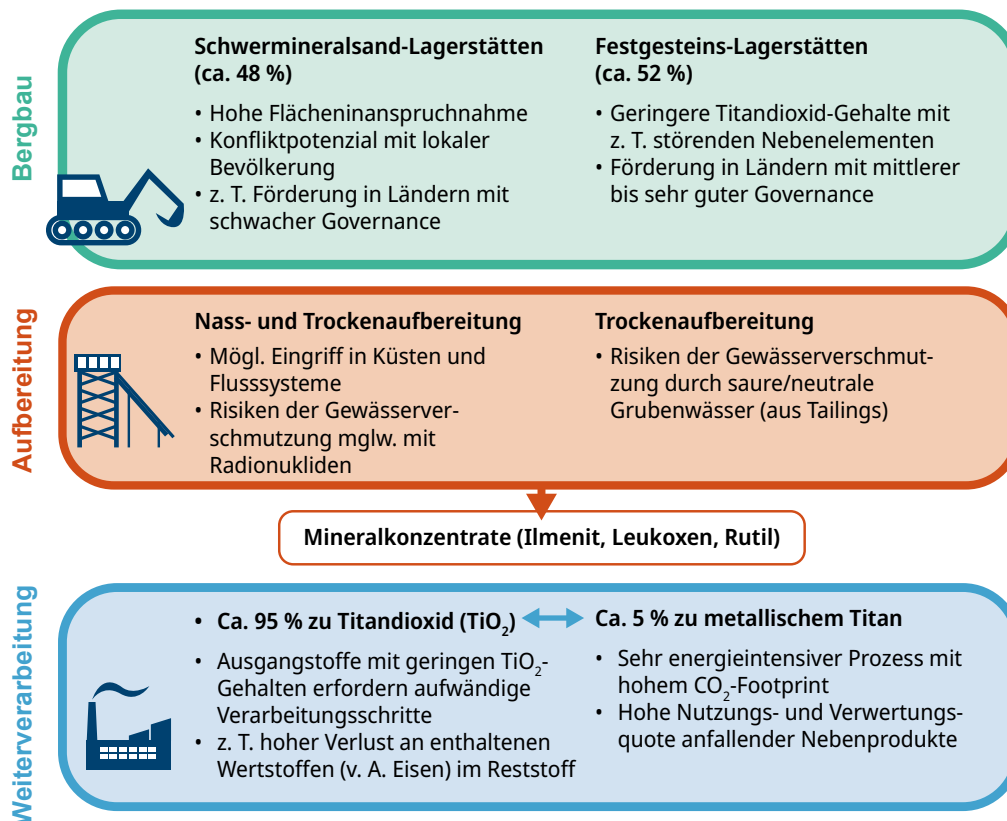


Abb. 1: Bergbau, Aufbereitung und Weiterverarbeitung von Titan dargestellt für den Abbau aus Schwermineralsand- und Festgesteinslagerstätten.

1 Relevanz von Titan

Titan kommt in oxidischer und metallischer Form in einer Vielzahl von alltäglichen Produkten zur Anwendung. Weltweit werden rund 90 % des Titans in Form von Titandioxid (TiO_2) eingesetzt [1]. Nur ein kleiner Anteil des Titans (6 – 7 %) findet demnach als Metall, in metallischen Legierungen, in Chemikalien und in Schweißelektroden Anwendung. TiO_2 ist weltweit das am häufigsten verwendete Weißpigment. Es zeichnet sich durch einen hohen Brechungsindex und eine hohe Deckkraft aus,

ist chemisch und thermisch sehr stabil und farbbeständig. Aufgrund dessen wird es in vielen Bereichen des alltäglichen Lebens verwendet, wie zum Beispiel in Farben, Kunststoffen, Papier, Kunstfasern, Gummi und Keramik. TiO_2 wird zudem auch in Lebensmitteln, Kosmetika und medizinischen Produkten eingesetzt. Die spezifischen Materialeigenschaften der verschiedenen Kristallmodifikationen des TiO_2 finden des Weiteren in der Nanotechnologie spezielle Anwendung [3].

2 Von der Lagerstätte zum Rohstoff

2.1 Geologie

Die wirtschaftlich wichtigsten Titanminerale Ilmenit, Rutil sowie Leukoxen können sowohl aus sedimentären Lagerstätten, den sog. Schwermineralsanden, als auch aus magmatischen Festgesteinslagerstätten gewonnen werden. Die Karte in Abbildung 2 zeigt die Verteilung der verschiedenen Lagerstätten in den zehn bedeutendsten Abbauländern.

Etwa die Hälfte der Titanminerale wird aus **Schwermineralsand-Lagerstätten** gewonnen, welche auch als Seifenlagerstätten (engl. placers, placer deposits) bezeichnet werden. Sie entstehen durch physikalisch-mechanische Anreicherung der Schwerminerale durch litorale (Strand), fluviatile (Fluss), marine (Meer) oder äolische (Wind) Transportprozesse. Schwerminerale sedimentieren bei Abnahme der Transportenergie früher als Minerale mit geringerem spezifischen Gewicht und gleicher Korngröße und können so angereichert werden. Neben den Titanmineralen werden unter anderem auch die Schwerminerale Zirkon, Monazit, Staurolith, Sillimanit/Disthen und Granat aus Schwermineralsand-Lagerstätten gewonnen

[4]. Im überwiegenden Teil dieser Lagerstätten ist Ilmenit das am häufigsten vorkommende Mineral.

Es werden verschiedene Typen von Schwermineralsand-Lagerstätten unterschieden. Von wirtschaftlicher Bedeutung sind dabei vor allem Strandseifen (litoral), Flusseifen (fluviatil) sowie Seifen in Küsten- und Binnendünen [4]. Schwerminerale können sich auch offshore entlang der Küste konzentrieren, wo sie sich zumeist linsenförmig ablagern und später durch Senkung des Meeresspiegels oberflächlich erhalten bleiben [5; 6]. Die Flusseifen, am bekanntesten sind Goldseifen, entstehen, wenn sich das durch Flüsse transportierte Sediment in strömungsärmeren Teilbereichen von Flüssen ablagert [4].

Strandseifen, die natürlicherweise häufig in Kombination mit Küstendünen auftreten, sind der bedeutendste Lagerstättentyp für Titanreiche (und auch Zirkonreiche) Schwermineralsande. Durch Verwitterung von Ilmenit kann Eisen aus dem Ilmenit gelaut werden. So entsteht aus Ilmenit das Verwitterungsprodukt

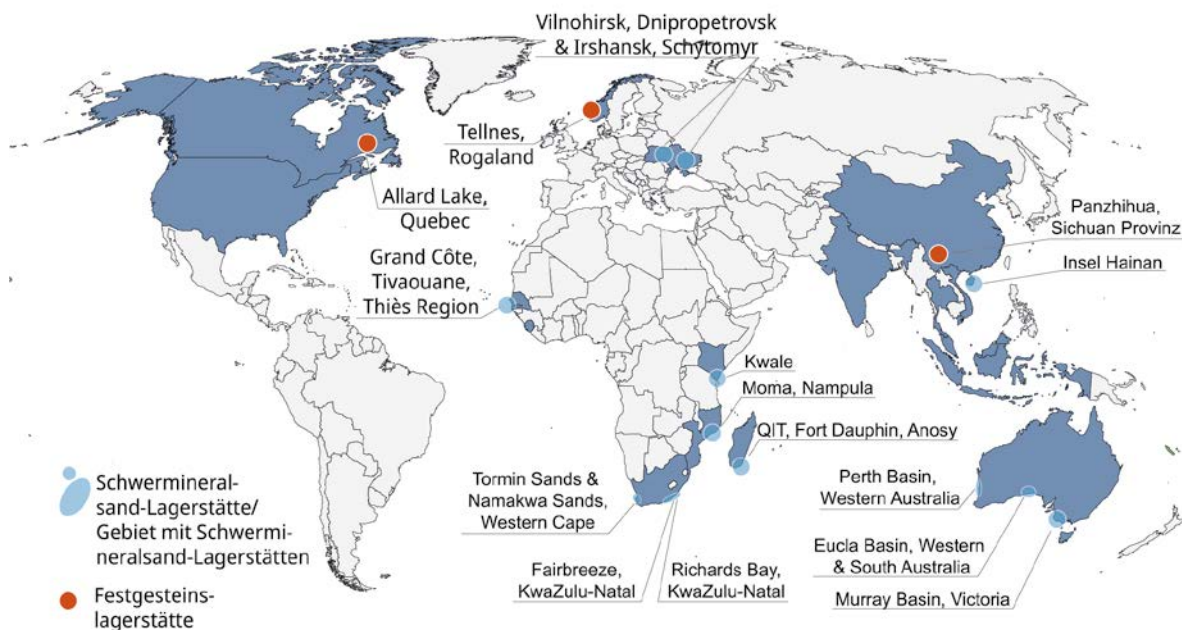


Abb. 2: Weltweite Übersicht der Länder, in denen Titanminerale abgebaut werden (blau eingefärbt), sowie der Abbaugebiete in den 10 wichtigsten Abbauländern.

Leukoxen, welches gegenüber Ilmenit an Titan angereichert ist [6].

Schwermineralsand-Lagerstätten können lokal sehr verschiedene Dimensionen haben. Zumeist handelt es sich um längliche Lagerstätten (max. wenige km breit) mit geringer Mächtigkeit (< 50 m) und großer Länge (z. T. über 20 km) [6].

Weltweit gibt es nur wenige im Abbau befindliche Festgesteinslagerstätten von Titanerzen, die aber insgesamt ca. 52 % der Titanmineralgewinnung stellen. Dort wird Ilmenit aus magmatischen Gesteinen gewonnen. Der TiO_2 -Gehalt des Ilmenits aus Festgesteinslagerstätten ist zumeist geringer als in Schwermineralsand-Lagerstätten, der relative Gehalt an Ilmenit im Erz ist jedoch erheblich höher. Ilmenit tritt dabei häufig als sog. Hämo-Ilmenit auf, ein Ilmenit mit höheren Eisengehalten. Häufig können diese Ilmenite auch erhöhte Chrom- und Magnesiumgehalte aufweisen [7], die die Weiterverarbeitung beeinträchtigen können. Die Festgesteinslagerstätten sind von großer

Bedeutung für die weltweite Titanproduktion und machen > 40 % der weltweit geförderten Menge (in TiO_2 Inhalt) aus.

2.2 Bergbau und Aufbereitung

Weltweit wurden im Jahr 2020 etwa 13,2 Mio t. Ilmenit, Leukoxen und Rutil (inkl. Titanschlacke) abgebaut [8], davon 38 % in China. Auf die zehn wichtigsten Abbauländer entfiel dabei im Jahr 2020 insgesamt ein Anteil von 93 % der weltweiten Förderung (Abb.3).

Bergbau und Aufbereitung unterscheiden sich je nach Lagerstättentyp, sodass diese im Folgenden für die Schwermineralsand-Lagerstätten und die Festgesteinslagerstätten separat beschrieben werden. In Abbildung 5 sind die einzelnen Prozessschritte von Bergbau, Aufbereitung und Weiterverarbeitung dargestellt.

Schwermineralsand-Lagerstätten

Aktive Schwermineralsand-Bergbaubetriebe (vergl. Abb. 2) befinden sich heute sowohl in

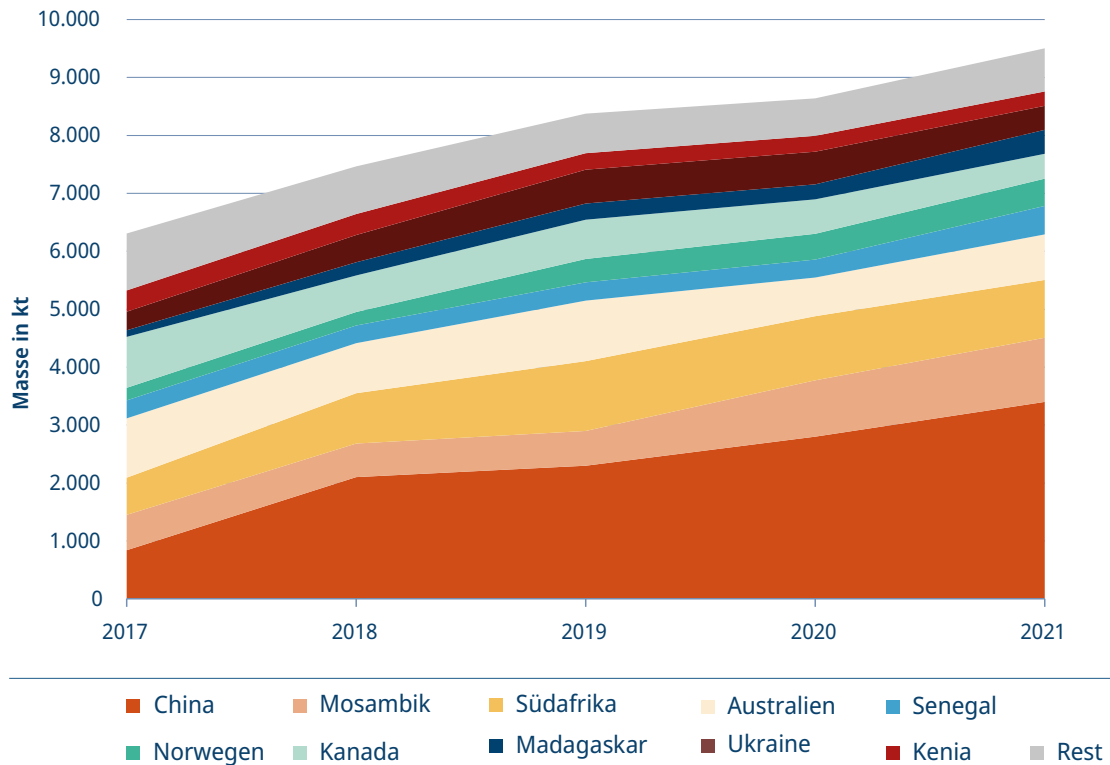


Abb. 3: Entwicklung der Bergwerksförderung von Titankonzentraten in den zehn bedeutendsten Abbau-ländern sowie dem Rest von 2017-2021. Die Förderung ist hier in kt TiO₂-Inhalt angegeben [2].

der Nähe von Küstenregionen, wie zum Beispiel im Perth Basin, Western Australia, als auch im Inland (Murray Basin, Victoria, Australien). Es handelt sich dabei zumeist um Strandseifen in Kombination mit Küstendünen. In Afrika gibt es zahlreiche wichtige Abbaugelände im Süden und Osten vor allem in Südafrika, Mosambik, Kenia und an der Südostküste Madagaskars, sowie in Westafrika im Senegal und in Sierra Leone [1; 4; 6]. In Sierra Leone befindet sich die größte fluviatile Lagerstätte, die zugleich auch die größte Rutil-Lagerstätte der Welt ist. In Europa befinden sich bedeutende Schwermineralsand-Lagerstätten in der Ukraine in den Verwaltungsregionen Dnipropetrowsk und Schytomyr. In den USA (Florida und Georgia) findet sich die größte schwermineralsandhaltige Binnendüne: Trail Ridge. Zu den bedeutenden aktiven Abbaugeländen zählen auch die Schwermineralsand-Lagerstätten an der Küste Indiens in den Bundesstaaten Odisha, Kerala und Tamil Nadu und an der nordöstlichen Küste Sri Lankas (Pulmoddai).

Weitere schwermineralsand-abbauende Länder sind Brasilien, Vietnam, Indonesien, Malaysia und Thailand [8]. Auch in Kasachstan, Russland sowie möglicherweise in Pakistan werden laut dem U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2023) geringe Mengen an Schwermineralsanden gefördert. In einigen dieser Länder liegt der Fokus des Abbaus jedoch vorwiegend auf anderen Mineralen wie Kassiterit oder Zirkon (Indonesien, Malaysia, Thailand) und die Titanminerale werden als Nebenprodukte gewonnen.

Beim Abbau der Schwermineralsande werden im Wesentlichen zwei Verfahren unterschieden, der Trocken- und der Nassabbau. Welches dieser Verfahren sich für eine Lagerstätte am besten eignet, hängt von verschiedenen Faktoren, wie z. B. dem Grundwasserspiegel, dem Grad der Verfestigung des Sedimentes und der Partikelgröße (bzw. dem tonigen Anteil) ab. Große Lagerstätten mit lockerem Gestein und geringem Anteil an tonigem Material eignen sich für den Nassabbau.

Kleinere, unzusammenhängende und ggf. stärker verfestigte Lagerstätten mit einem höheren Anteil an tonigem Material werden eher im trockenen Verfahren abgebaut [9]. Beim Nassabbau wird das Sediment unterhalb des Grundwasserspiegels mithilfe eines schwimmenden Saugbaggers abgebaut und von dort in die Nassaufbereitungsanlage gepumpt. Diese Anlagen sind größtenteils schwimmend und befinden sich meist in direkter Nähe zum Saugbagger (Abb. 4).

Im Trockenabbauverfahren werden Bagger eingesetzt um das Sediment abzubauen, mithilfe von LKWs und/oder Förderbändern wird es dann in die Nassaufbereitung transportiert. Beim Trockenabbauverfahren wird das Sediment für die Nassaufbereitung in eine Suspension überführt. In der Nassaufbereitung werden verschiedene Siebtechniken, Wendelscheider, Hydrozyklone und Eindicker eingesetzt. Hier wirken dementsprechend gravitative Sortier- und Klassiermethoden um die Schwerminerale von feinem tonigen Material, Quarz und anderen spezifisch leichteren Bestandteilen zu trennen. Neben dem Schwermineralkonzentrat fallen Rückstände an, die wieder für die Verfüllung der Abbaubereiche genutzt werden. Im ersten Schritt der Trockenaufbereitung wird Ilmenit magnetisch von den anderen Mineralen

getrennt. Anschließend wird das nichtmagnetische Material (Wertminerale vor allem Rutil und Zirkon) ggf. von Oberflächenanhaftungen gereinigt, bevor es weiter behandelt wird. Hier kommen elektrostatische, magnetische und zum Teil auch wieder gravitative Sortierprozesse zum Einsatz, um die wertvollen Schwerminerale von den übrigen Mineralen abzutrennen. Ilmenit, Rutil und Zirkon weisen unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf deren Magnetisierbarkeit und elektrische Leitfähigkeit auf, sodass sie durch Magnetseparation und elektrostatischer Separation in unterschiedliche Konzentrate getrennt werden können.

Es resultieren so die Titanmineralkonzentrate in verschiedenen Produktqualitäten, welche dann in verschiedenen Aufbereitungsschritten weiterverarbeitet werden.

Festgesteinslagerstätten

Ilmenit aus Festgesteinen wird aktuell in Kanada (Allard Lake), Norwegen (Tellnes) und China (Panzhihua, Sichuan Provinz) abgebaut (vgl. Abb. 2). Die Lagerstätte am Allard Lake in Quebec, Kanada ist dabei die größte Ilmenit-Festgesteinslagerstätte mit ca. 152 Mio. t Erz mit einem Gehalt von ca. 80 Gew.-% (Hämo-)Ilmenit [10]. Der TiO_2 -Gehalt des Gesamtgesteins liegt hier zwischen 32 und 38 Gew.-%. In Tellnes in

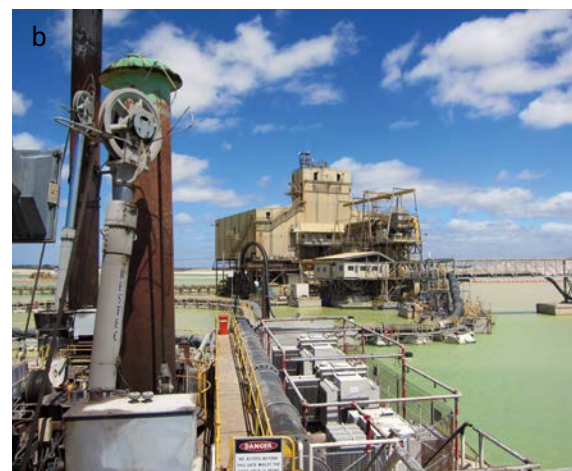


Abb. 4: Schwermineralsand-Abbau im Westen von Australien (Cooljarloo, TRONOX). Die Schwerminerale werden hier im Nassabbauverfahren gewonnen. Abbildung (a) zeigt den Saugbagger, der das Sediment abbaut. Von dort aus wird es in die schwimmende Nassaufbereitungsanlage (b) gepumpt. Fotos: BGR

Rogaland, Norwegen, sind die durchschnittlichen TiO_2 -Gehalte mit 16 – 20 Gew.-% erheblich geringer. Die Reserven werden hier auf ca. 57 Mio. t TiO_2 geschätzt. In China wird Ilmenit in Panzhihua im Süden der Provinz Sichuan abgebaut. Bei dieser Lagerstätte handelt es sich um eine geschichtete magmatische Intrusion mit TiO_2 -Gehalten von ca. 10 Gew.-% TiO_2 [11; 12]

Ilmeniterz wird in diesen Lagerstätten im Tagebau abgebaut und durch Brechen und Mahlen zerkleinert. Danach folgt die Aufbereitung mittels Sieben und Schwerkraftabscheidung. Anschließend wird das Erz getrocknet und geröstet um eine anschließende Magnetseparation zu ermöglichen [13]. Aus der Magnetseparation wird das aufbereitete Mineralkonzentrat gewonnen, welches häufig zu Titanschlacke weiterverarbeitet wird. Je nach Zusammensetzung des Gesteins können bei der Aufbereitung auch Flotationsprozesse zum Einsatz kommen [14].

2.3 Weiterverarbeitung

Der überwiegende Anteil an Ilmenit, Leukoxen und Rutil wird für die **Herstellung von TiO_2** verwendet. Dieses kann entweder durch das Chlorid- oder das Sulfatverfahren gewonnen werden (vgl. Abb. 5). Für das ältere Sulfatverfahren werden Ausgangsstoffe mit geringeren TiO_2 -Gehalten, wie Ilmenit (mit ca. 52 – 54 % TiO_2) und Titanschlacke, eingesetzt. Im neueren Chloridverfahren werden Ausgangsstoffe mit höheren TiO_2 -Gehalten benötigt. Dazu zählen Rutil, synthetischer Rutil, Leukoxen, Titanschlacke (> 85 % TiO_2) und Ilmenitkonzentrate (> 58 % TiO_2). Es gibt verschiedene Prozesse mit denen die TiO_2 -Gehalte von Ausgangsstoffen, wie z. B. Konzentraten mit geringen TiO_2 -Gehalten, so weiterverarbeitet werden können, dass Produkte mit höheren TiO_2 -Gehalten (z. B. Titanschlacke, synthetischer Rutil) entstehen.

Titanschlacke wird durch das Schmelzen von Ilmenit im Elektrolichtbogenofen bei > 1.600°C gewonnen. Durch die Reduktion des Ilmenits

mit Kohlenstoff und den Schmelzvorgang entsteht metallisches Eisen sowie eine aufschwimmende Titanschlacke. Das Roheisen (sog. pig iron) wird als Nebenprodukt gewonnen und kann als Rohstoff bei der Stahlherstellung eingesetzt werden. Bei der Herstellung von synthetischem Rutil wird Ilmenit im Drehrohfen bei ca. 1.100°C mit Kohle (Becher Prozess) oder Schweröl (Benilite Prozess) reduziert [9; 15]. Durch die Reduktion wird das Eisen im Ilmenit zu metallischem Eisen, welches später in verschiedenen Prozessschritten aus dem Ilmenit entfernt wird.

Die Art und Anzahl dieser Prozessschritte variiert je nach angestrebter Qualität des Endproduktes und den charakteristischen Eigenschaften des Ausgangstoffes (z. B. Beimengungen anderer Elemente im Ilmenit, Begleitminerale). Das resultierende Material besteht aus porösen TiO_2 -Partikeln mit ca. 88 – 95 % TiO_2 . Da es dem natürlichen Rutil sehr ähnlich ist, wird es als synthetischer Rutil bezeichnet.

Im Sulfatverfahren werden die o. g. Einsatzstoffe mit konzentrierter Schwefelsäure aufgeschlossen. So entsteht erst Titanylsulfat welches in weiteren Prozessschritten erst durch Hydrolyse zu Titanoxidhydrat und dann durch Kalzinieren zu TiO_2 umgewandelt wird [16]. Um das fertige Weißpigment zu erhalten, wird das gewonnene TiO_2 getrocknet, gemahlen und nachbehandelt. Die Prozessschritte zu Nachbehandlung sind im Sulfat- und Chloridverfahren gleich.

Beim Chloridverfahren reagieren die Einsatzstoffe in einem Wirbelschichtofen mit Chlorgas und Koks bei ca. 1.000°C. Dadurch entsteht ein Gasstrom in dem Titan-tetrachlorid (TiCl_4) zusammen mit Oxiden, Kohlenstoff und anderen Metallchloriden enthalten ist. Durch Abkühlung des Gasstroms werden zunächst die anderen Metallchloride (ohne TiCl_4) abgetrennt. Durch weitere Abkühlung kondensiert das TiCl_4 -Gas und wird anschließend bei hohen Temperaturen im Oxidationsreaktor oxidiert um TiO_2 zu gewinnen [16].

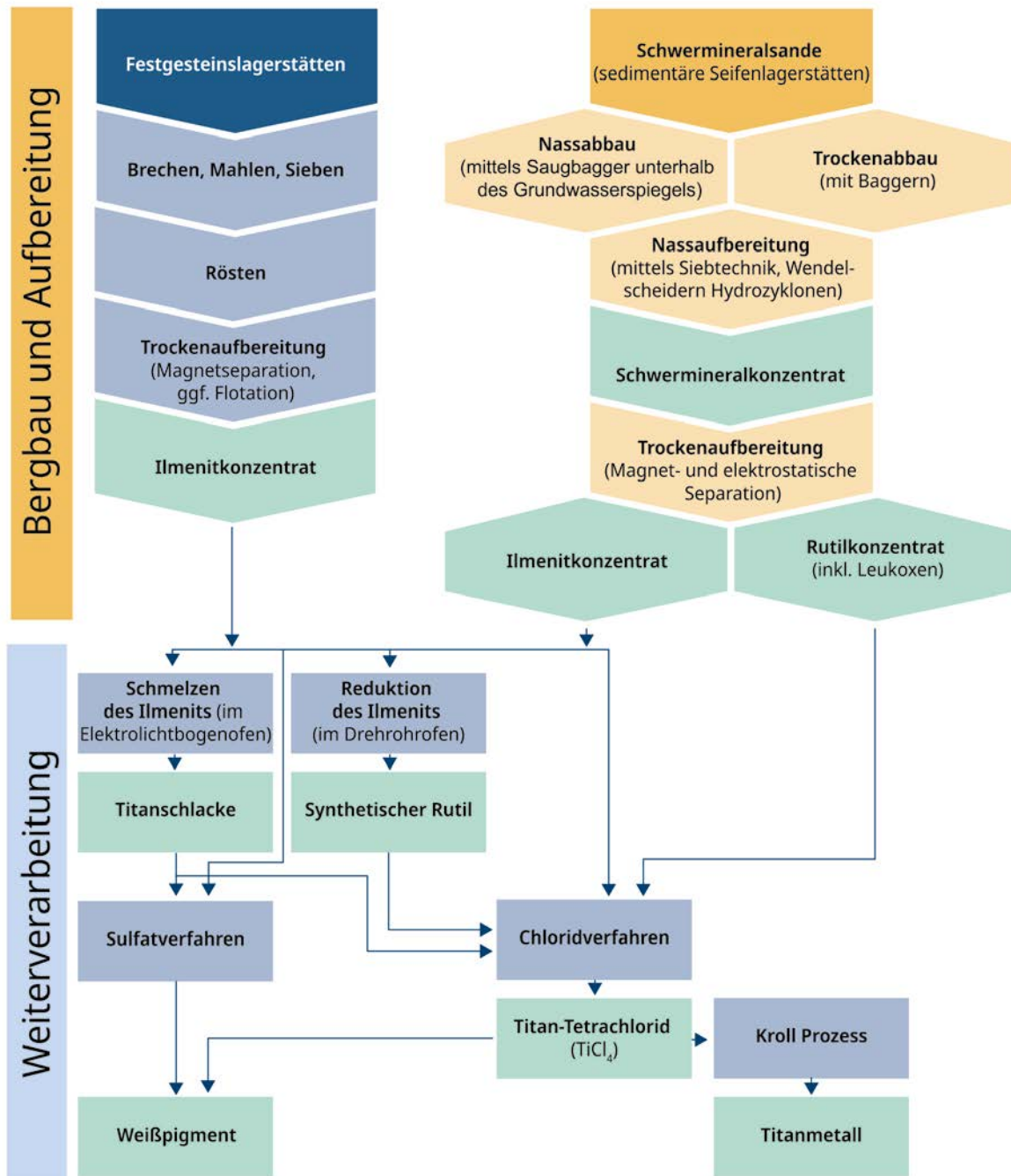


Abb. 5: Die einzelnen Verfahrensschritte im Bergbau, der Aufbereitung und der Weiterverarbeitung von Titanmineralen für die Produktion von Titandioxid und Titanmetall.

Die Produktion von TiO_2 findet vor allem in China, den USA und Deutschland sowie in Japan, Großbritannien, Mexiko und Australien statt. China hat dabei mit etwa 53 % die weltweit größten Kapazitäten. Diese belaufen sich

in den USA auf ca. 14 %, in Deutschland auf ca. 5 %, sowie auf jeweils etwa 3 % in den übrigen o. g. Produktionsländern. Zudem wird in Saudi-Arabien, der Ukraine, Indien, Kanada, Russland und Kasachstan TiO_2 hergestellt.

Titan in metallischer Form wird heute fast ausschließlich im sog. Kroll-Prozess gewonnen. In diesem Prozess wird durch die magnesiothermische Reduktion von $TiCl_4$ ein Titanschwamm erzeugt der i. d. R. durch anschließende Vakuumdestillation von Magnesium und Magnesiumchlorid gereinigt wird [17]. Der entstandene Titanschwamm wird zumeist zunächst gebrochen, gemahlen und erneut gepresst. Er wird im Vakuumlichtbogenofen geschmolzen und kann dann zu Barren, und anschließend durch Warm- und Kaltwalzen zu Blechen weiterverarbeitet werden. Durch weitere Prozessschritte kann aus dem festen Titanmetall ein Pulver erzeugt werden, welches bei der Produktion

von Titanlegierungen zum Einsatz kommt. Das zu Beginn eingesetzte $TiCl_4$ wird analog zum Chloridverfahren durch Chlorieren von Einsatzstoffen mit hohem Titangehalt erzeugt (siehe oben).

Für Titanmetall liegen die größten Produktionskapazitäten ebenfalls in China (ca. 52 %). Weltweit wird Titanschwamm des Weiteren in Japan produziert, welches 2022 mit ca. 20 % an Platz zwei der weltweiten Titanschwammproduktion stand. Weitere Produktionsländer sind Russland, Kasachstan, Saudi-Arabien, die Ukraine und Indien [18].

3 Recycling

Das in Farben, Kunststoffen, Papier und vielen anderen Produkten eingesetzte TiO_2 wird aus diesen Produkten nicht recycelt. Zumeist werden titandioxidhaltige Produkte stofflich verwertet, wobei die eigentliche Funktion als Weißpigment keine Rolle spielt. Des Weiteren landet das Titandioxid durch seinen dissipativen Einsatz über die Abfallströme in Klärwerke, Müllverbrennungsanlagen und Deponien [19].

Das Recycling von **Titanmetall** ist hingegen weitgehend etabliert und deckt laut EU Kommission ca. 19 % der Rohstoffnachfrage in Europa [20]. Die UNEP (United Nations Environment Programme) schätzt in ihrem Bericht über das Recycling von Metallen die sog. End-of-Life Recycling Rate (EOL-RR) für Titanmetall auf > 50 %. Dies bedeutet, dass mehr als die Hälfte des metallischen Titans in irgendeiner Form, sei es als reines Metall oder in einer Legierung, wieder recycelt wird. Auch hier wird der Anteil von sekundärem Titan (z. B. Titanschrott) an der Gesamteinsatzmenge auf 10 – 25 % geschätzt [21]. Zudem gibt es verschiedene Aspekte die zur Material- und Ressourceneffizienz der Titanmetallherstellung beitragen. So werden die während des Produktionsprozesses entste-

henden Prozessrückstände, je nach Titangehalt, wieder für die Herstellung von Titanmetall und Titanlegierungen verwendet oder für die Produktion anderer Legierungen (z. B. Ferrotitan) eingesetzt. Ca. 90 % der anfallenden Produktionsrückstände können so direkt wiedereingesetzt oder der Kaskadennutzung zugeführt werden. Auch bei der Verarbeitung des Titanmetalls können große Mengen an Rückständen, meist in Form von Titanspänen, anfallen. Diese Späne können nach der Reinigung wieder dem Schmelzprozess der Titanmetallherstellung zugeführt werden. Da Titanschrotte bzw. Titanspäne allerdings einen erhöhten Sauerstoffgehalt aufweisen, ist es nicht möglich, Titanmetall ausschließlich aus diesen sekundären Quellen herzustellen [22].

Der hohe Anteil des Titans, welcher in Form von TiO_2 Verwendung findet, kann somit nicht recycelt werden. Basierend auf der Annahme, das ca. 6–7 % des Titans in metallischer Form eingesetzt wird und die EOL-RR ca. 50 % beträgt, kann man für Titan von einer Gesamtreyclingrate von ca. 3 % ausgehen.

4 Nachhaltigkeit Aspekte des Bergbaus

4.1 Umweltaspekte

Der Abbau von Schwermineralsanden ist im Vergleich zum Abbau von Mineralen aus Festgesteinen mit geringerem Aufwand verbunden, da es sich meist um einfach zugängliche Lockergesteine mit einer geringmächtigen Schicht an überlagerndem Abraum handelt. Das Verhältnis an wertvollen Schwermineralen zu **Bergbaurückständen** variiert in Abhängigkeit vom Schwermineralgehalt der jeweiligen Lagerstätte. Nach VAN GOSEN et al. (2014) entstehen bei einem durchschnittlichen Gehalt von 4 % Schwermineralen (gemittelt anhand von 26 Lagerstätten) beim Abbau von 10 Mio. t Material ca. 9,6 Mio. t (ca. 6 Mio. m³) Bergbaurückstände, d. h. pro t Schwerminerale etwa 24 t Bergbaurückstände. Diese Rückstände bestehen überwiegend aus Quarz sowie tonigen Partikel, die zum großen Teil wieder zur Verfüllung der Abbaustellen bzw. für die Wiederherstellung der ursprünglichen Landschaft genutzt werden (bei Dünen) [9]. Der **Flächenbedarf** des Schwermineralsand-Abbaus kann ähnlich wie das Erz/Abraum Verhältnis stark variieren. Aus einer Life-Cycle Assessment Studie, in der die Umwelteinflüsse des Abbaus von Ilmenit und Rutil in Australien untersucht werden, ergibt sich zum Beispiel eine relativ hohe Flächeninanspruchnahme von ca. 14,9 m²/t Ilmenit [23]. Vergleicht man die Produktionszahlen des Unternehmens Iluka Resources von 2020 (ca. 629.000 t Ilmenit und Rutil) mit der im Nachhaltigkeitsbericht angegeben genutzten Landfläche so ergibt sich eine Flächeninanspruchnahme von ca. 8,9 m²/t Ilmenit und Rutil [24; 25]. Zur Flächeninanspruchnahme des Abbaus von Titan aus Festgesteinslagerstätten existieren in der Literatur keine Angaben. Sie liegt aber aufgrund der i. d. R. höheren Gehalte an Titanmineralen vermutlich im Durchschnitt unter der des Abbaus aus Schwermineralsand-Lagerstätten. Berechnet man die etwaige direkte Flächeninanspruchnahme pro Tonne Ilmenit durch die Auswertung von Satellitenbildern so

ergibt sich für Kanada (Allard-Lake) ein Wert von ca. 1,3 m²/t und für Norwegen (Tellnes) ein Wert zwischen 6,4 und 7,5 m²/t (in Abhängigkeit von der Quelle für die jährliche Ilmenitproduktion).

Das Abtragen großer Mengen an Material kann je nach Lagerstättentyp (Festgestein- oder Schwermineralsand-Lagerstätte) und in Abhängigkeit der lokalen Umgebungsbedingungen einen mehr oder weniger großen **Eingriff in das bestehende Ökosystem** bedeuten. Beim Nassabbau von Schwermineralsanden kann es zum Beispiel zur Änderung der hydrogeologischen Umgebungsbedingungen kommen, welche die potenzielle Gefahr der Grundwasserverschmutzung birgt. Insbesondere in Küstenregionen können fragile Küsten- und Dünensysteme durch den Abbau stark beeinträchtigt werden, wie es z. B. in Indien im Abbauggebiet bei Chavara (Kerala) beobachtet wurde. Dies bringt negative Aspekte für die dort lebende marine und an Land lebende Flora und Fauna mit sich und kann den natürlichen Schutz vor Küstenerosion und Sturmereignissen (Hurrikans o.ä.) verringern [6; 23; 26; 27]. In Nagonha, Mosambik führte der Abbau und die Destabilisierung der Dünen z. B. vermehrt zum Eindringen von Salzwasser in küstennahe Süßwassergebiete. In 2015 kam es zudem in der Region zu Überschwemmungen deren Ausmaß durch die z. T. fehlende Schutzwirkung der Dünen noch verstärkt wurde.

Durch die hohe Flächeninanspruchnahme ist es wichtig den Oberboden aufzunehmen und so zu lagern, dass er besonders in tropischen Bereichen wieder zur Renaturierung verwendet werden kann und die Bodenfruchtbarkeit erhalten wird. Findet der Abbau von Schwermineralsanden in bewaldeten Regionen, statt, werden ggf. Waldflächen zerstört. Beispielsweise wurde in Madagaskar für das Abbauggebiet von RioTinto (QIT Madagascar Minerals) ca. 60 km² Wald entfernt. Jedoch sind mit dem Abbau und

der Aufbereitung von Schwermineralsanden im Vergleich zu vielen anderen Rohstoffen kaum Schadstoffemissionen verbunden. So werden in den Mineralen enthaltene Schwermetalle durch die primären Aufbereitungsverfahren (Nass und Trockenaufbereitung) nicht freigesetzt [6]. Zudem enthalten Schwermineralsand-Lagerstätten in der Regel keine Sulfide, welche zur Bildung saurer Grubenwässer führen können. In Schwermineralsanden sind die Titanminerale allerdings natürlicherweise mit den Mineralen Zirkon und Monazit vergesellschaftet, welche Uran und Thorium enthalten. Bei Nass- und Trockenaufbereitung werden

diese Minerale aufkonzentriert. Eine erhöhte radioaktive Strahlenbelastung für Mitarbeitende der Abbauunternehmen (z. B. durch Stäube) sowie die mögliche **Freisetzung von Radionukliden** in umgebende Wasserkörper sind somit mögliche Umweltbelastungen, die beim Abbau von Schwermineralsanden beachtet werden müssen [6].

Um Eingriffe in die Natur so gering wie möglich zu halten, spielen bestimmte umweltschützende Maßnahmen eine besondere Rolle. Beim Abbau von Schwermineralsanden sind aufgrund der großen Flächeninanspruchnahme das Monitoring und **Schutzmaßnahmen** von Flora und Fauna, der grundwasserabhängigen Ökosysteme, der Bodeneigenschaften sowie der Topografie besonders relevant. Diese fließen in einen Schließungsplan ein, der es ermöglichen soll, die Fläche gezielt für die Nachnutzung vorzubereiten oder möglichst schnell in den ursprünglichen Zustand zurück zu führen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft eine ehemalige Abbaufäche nach der Wiederherstellung des vorherigen Landschaftsbildes durch die Einspülung und Verteilung der Aufbereitungsrückstände (hauptsächlich Quarz und Feldspäte) und des gelagerten Oberbodens (Abbildung 6a), sowie eine bereits mit Pflanzen und kleineren Bäumen bewachsene Renaturierungsfläche (Abbildung 6b) der Lagerstätte Moma in Mosambik. Angaben der Zircon Industry Association (ZIA) zufolge, welche aufgrund der häufigen Verknüpfung von Titan- und Zirkonabbau hier vergleichend herangezogen werden können, verstärken sich die Aktivitäten der Bergbauunternehmen in Bezug auf die nachhaltige Sanierung der Bergbauflächen. Die Anteile an rehabilitierten Flächen sind demnach in den letzten Jahren erheblich gestiegen [28]. Hier sind neben den Unternehmen auch die staatlichen Stellen gefordert, die Sanierungs- und Renaturierungspläne entsprechend kritisch zu begleiten und die Maßnahmen zu kontrollieren.

Insbesondere in Ländern mit einer schwachen Governance ist dies allerdings oft problematisch. In Abbaugebieten, wo umweltschützen-

a



b



Abb. 6: Vergleich zweier Renaturierungsflächen in unterschiedlichen Stadien der Lagerstätte Moma in Mosambik. (a) mit Aufbereitungsrückständen aufgefüllte Fläche nach dem Abbau. (b) ehemalige Abbaufäche einige Jahre nach begonnener Rekultivierung. Fotos: BGR

de Maßnahmen nicht ergriffen werden und **illegaler Abbau** in großem Stil betrieben wird (Bsp. Indien siehe Kapitel 4.3), können erhebliche Schäden an Fluss- und Küstensystemen entstehen, die ganze Ökosysteme beeinflussen. Durch Beeinträchtigung dieser Systeme können z. B. Fischpopulationen geschädigt werden, oder landwirtschaftlich genutzte Flächen unbrauchbar werden, die die Nahrungsgrundlage für die lokale Bevölkerung bilden.

Ein Fall, in dem der Abbau von Schwermineralen zur Verschmutzung wichtiger Binnengewässer geführt haben soll, ist aus Madagaskar (QIT Madagascar Minerals) bekannt. In den umgebenden Flüssen und Seen des zum größten Teil von Rio Tinto betriebenen Abbaubereichs nahe Fort Dauphin (Anosy) waren 2018 erhöhte Konzentrationen an Uran und Blei gefunden worden. Zudem waren im Bereich der Pufferzone zwischen den angrenzenden Flüssen und dem Abbau nicht genehmigte Aufschüttungen aus Aufbereitungsrückständen angelegt worden. Rio Tinto bestritt jedoch einen Zusammenhang der erhöhten Uran- und Blei-Gehalte mit deren Abbautätigkeiten. Die Aufschüttungen wurden aus der Pufferzone entfernt und eine unabhängige Beratungsfirma beauftragt, das Gebiet über einen Zeitraum von 12 Monaten zu untersuchen. Ergebnisse verschiedener Studien stützten schlussendlich die Annahme, dass die Abbauaktivitäten zur Erhöhung der Uran- und Blei-Konzentrationen (Blei als Zerfallsprodukt von Uran und Thorium) und damit zur Anreicherung von Radionukliden in den Flüssen und Seen führen konnten [29]. In der Region kam es seitdem immer wieder zu Konflikten um das Wassermanagement der Betriebe und die Auswirkungen für die lokale Bevölkerung [27; 30].

Umfassende Informationen zu **Umwelteinflüssen des Abbaus von Titanmineralen aus Festgesteinen** sind in der Literatur selten zu finden. Der Abbau von Ilmenit aus Festgesteinen greift allerdings ebenso in bestehende Naturräume ein und kann in Abhängigkeit von Lage und Umgebung sehr unterschiedlich sein. Aufgrund der höheren Erzgehalte (z. B. Kanada, Allard

Lake mit bis zu 80 Gew.-% Hämo-Ilmenit; Norwegen, Tellnes ca. 50 Gew.-%) in Festgesteinslagerstätten ist die relative Menge an Abraum meist geringer als in Schwermineralsand-Lagerstätten. In Kanada wird das beim Abbau anfallende Bergematerial, welches vor allem aus Silikaten, sowie Eisen- und Titanoxiden besteht, auf Halden gelagert. In den nächsten ca. 30 Jahren werden dort durch die Erweiterung des Bergbaubetriebes ca. 119 Mm³ Bergematerial anfallen, welches dann in nahegelegenen Seen abgelagert wird. Mögliche Folgen für die Umwelt sind in einem Bericht der Firma WSP dargestellt, wobei sowohl der Eingriff in die aquatischen Lebensräume der umgebenden Seen, als auch die Abholzung umgebender Wälder als potenzielle Gefährdungen beschrieben werden [31]. Zudem enthält das Bergematerial geringe Mengen an sulfidischen Erzen, vor allem Pyrit, welches bei zunehmender Verwitterung zur Bildung saurer Grubenwässer führen kann. Durch die gleichzeitige Verwitterung der silikatischen Minerale, wird dieses gepuffert, sodass die untersuchten Grubenwässer hier neutral waren. In der Vergangenheit sind jedoch in diesen Grubenwässern Kontaminationen von Schwermetallen, insb. Nickel, in erhöhten Konzentrationen nachgewiesen worden [32; 33]. In Norwegen wurden die Bergematerialien über einen langen Zeitraum in den nahegelegenen Fjord geleitet und führten zur Reduktion der lokalen, marinen Biodiversität [34]. Seit 1994 existiert dort eine an Land gelegene Halde mit Aufnahmekapazitäten bis ca. 2025. Aufgrund ähnlicher Zusammensetzung des Bergematerials ist auch hier die Auslaugung von Nickel eine mögliche Gefahrenquelle für die Umwelt und wird in mehreren Studien beleuchtet [35; 36].

Neben dem Eingriff in bestehende Naturräume werden beim Abbau der Titanminerale, wie auch bei anderen Abbautätigkeiten, erhebliche Mengen an Wasser und Energie benötigt bzw. verbraucht sowie CO₂ emittiert. Die Studie von FARJANA et al. (2018) berechnet für die Produktion von 1 t Ilmenit (aus Schwermineralsand-Lagerstätten) einen Bedarf von ca. 9 m³ Wasser [23]. Aus der Arbeit von PERKS et al. (2022) ergibt sich ein Wasserbedarf von 10 – 26 m³/t

Schwermineralsand [12]. Im Vergleich dazu ist der Wasserbedarf beim Abbau von Festgesteinen mit $< 5 \text{ m}^3/\text{t}$ Ilmenitkonzentrat etwas geringer. Der Energieverbrauch des Abbaus aus Schwermineralsanden ist stark abhängig vom Erzgehalt und steigt entsprechend mit sinkendem Gehalt an Titanmineralen [12]. Der Energieverbrauch und die durch den Abbau von Titanmineralen verursachten **CO₂-Emissionen** variieren stark in Abhängigkeit der jeweiligen Lagerstätte und der zur Verfügung stehenden Energieerzeugung. Die Gewinnung von Schwermineralkonzentrat aus Schwermineralsand im Murray Basin verbraucht in Australien ca. $2,95 \text{ GJ}/\text{t}$, während in Mosambik (Moma) nur ca. $0,9 \text{ GJ}/\text{t}$ benötigt werden. Der Energieverbrauch des Abbaus aus Festgesteinslagerstätten variiert ebenso stark von ca. $0,21 \text{ GJ}/\text{t}$ Ilmenitkonzentrat in Kanada (Allard Lake) bis $1,43 \text{ GJ}/\text{t}$ Ilmenitkonzentrat in China (Sichuan Provinz). Die daraus resultierenden CO₂-Emissionen werden vor allem durch die primäre Energiequelle beeinflusst. So zum Beispiel wird in Kanada und Norwegen vor allem Wasserkraft zur Energieerzeugung genutzt, so dass nur ca. $0,01 \text{ t CO}_2\text{-Äquivalente (CO}_{2e}\text{)}/\text{t}$ Schwermineralkonzentrat emittiert werden. Auch in Mosambik trägt die Nutzung von Wasserkraft zu einem verhältnismäßig geringen CO₂-Fußabdruck bei ($0,09 \text{ t CO}_{2e}/\text{t}$ Schwermineralkonzentrat). Im Vergleich dazu wird in China vorwiegend Kohle zur Energieerzeugung eingesetzt, was in einer Emission von ca. $0,3 \text{ t CO}_{2e}/\text{t}$ Schwermineralkonzentrat resultiert. Auch in Südafrika und Australien wird der Energiebedarf zu großen Teilen durch fossile Energieträger (Öl, Gas, Kohle) gedeckt. Bei der Betrachtung von Wasser- und Energieverbrauch sowie den CO₂-Emissionen muss zusätzlich beachtet werden, dass die Erze aus Festgesteinslagerstätten immer einer weiteren Aufbereitung (zu Titanschlacke o. synthetischem Rutil) zugeführt werden müssen, während die Titanmineralkonzentrate aus Schwermineralsand-Lagerstätten z. T. direkt im Chlorid- oder Sulfatverfahren eingesetzt werden können (siehe auch Kapitel 5.1).

4.2 Soziale und sozioökonomische Bedeutung

In den meisten großen Abbauländern, wie z. B. China, Australien und Südafrika, hat der Abbau von Titanmineralen im Vergleich zu anderen Rohstoffen eine eher untergeordnete wirtschaftliche Bedeutung. In einigen wenigen Ländern entfallen jedoch bedeutende Anteile des dort erwirtschafteten Wertes auf die Produktion von Rutil und Ilmenit. In Sierra Leone machte deren Produktion etwa 40 % des Wertes an Rohstoffen aus, wobei der Anteil des Rohstoffsektors am Gesamtexportwert ca. 67 % beträgt [37]. In Madagaskar liegt der Anteil des Titanmineralabbaus (Ilmenit) bei ca. 26 % des gesamten Wertes der Rohstoffproduktion, wobei ca. 18 % des Exportwerts des Landes auf den Rohstoffsektor entfallen [38]. Im Senegal liegt der Anteil am Wert exportierter Rohstoffe für Titanminerale (Ilmenit, Rutil und Leukoxen) bei ca. 8 % und auch in Mosambik entfallen etwa 12 % auf diese Rohstoffe [39; 40]. Aus den Exportdaten des Global Trade Trackers [41] geht hervor, dass auch in Sri Lanka, Kenia, Vietnam, Südkorea und Norwegen ein Anteil von $> 5 \%$ der exportierten Rohstoffe auf Titanerze entfällt.

Der Abbau von Titanmineralen kann sowohl positive als auch negative soziale und sozioökonomische Auswirkungen auf die vor Ort lebende Bevölkerung haben. Umfassendere Informationen dazu gibt es vor allem für den Abbau aus Schwermineralsand-Lagerstätten. Die Nachhaltigkeitsberichte der großen Schwermineralsandabbauenden Firmen wie Rio Tinto, Iluka Resources, Kenmare Resources, Tronox und Base Resources zeigen, welche verschiedene Maßnahmen ergriffen werden, um die Arbeits- und Lebensbedingungen der lokalen Bevölkerung positiv zu beeinflussen. Viele der genannten Firmen streben es an, überwiegend lokale Arbeitskräfte zu beschäftigen und lokale Dienstleister zu nutzen, sodass neue Arbeitsplätze entstehen und ansässige Unternehmen gefördert werden. Dazu unterstützen und finanzieren einige Firmen, wie z. B. Base Ressour-

ce in Kenia, die Ausbildung von Fachkräften vor Ort und etablieren Stipendienprogramme [42]. Des Weiteren gibt es hier Programme zur Verbesserung der Lebensgrundlage mit Fokus auf Landwirtschaft und Tierzucht sowie Infrastrukturmaßnahmen zur Verbesserung der Wasserversorgung, der medizinischen Versorgung und schulischen Ausbildung. Ganz ähnliche Förderprogramme werden auch im Nachhaltigkeitsbericht des Unternehmens Kenmare Resources beschrieben, welches in Mosambik (Moma) abbaut [43].

Bezüglich der negativen Folgen des Schwermineralsand-Abbaus fasst eine aktuelle Studie zusammen, dass insbesondere die Veränderung der sozioökonomischen Gegebenheiten und der Existenzgrundlage der Bevölkerung sowie die Zerstörung der Umwelt und die Beeinträchtigung der Ökosysteme in vielen Fällen Auslöser für lokale Konflikte sind [27]. Durch den großräumigen Abbau von Schwermineralsanden kommt es z. B. häufig zu Landnutzungskonflikten, und Umsiedlung. Beispiele dafür sind u. a. aus Mosambik und Kenia bekannt, wo viele Menschen gezwungen waren (und sind) ihre Heimatorte zu verlassen. Häufig müssen sich Familien in anderen, z. T. weit entfernten Gebieten neu ansiedeln, in denen der Zugang zu Wasser und landwirtschaftlichen Nutzflächen für die Subsistenzwirtschaft nicht wie zuvor gegeben ist. Daraus resultiert eine soziale und kulturelle Entwurzelung häufig kombiniert mit neuen Herausforderungen für die eigene Versorgung. Um den negativen Einfluss auf die umzusiedelnde Bevölkerung möglichst gering zu halten gibt es bei großen Abbaunehmen wie Kenmare Resources (Mosambik, Moma) oder Base Resources (Kenia, Kwale) einen sog. „Resettlement Action Plan“, in dem neue Wohngebäude, Infrastrukturen und Nutzflächen für die umzusiedelnde Bevölkerung sowie Entschädigungen für die Betroffenen festgelegt sind. Laut Firmenberichten läuft die Planung im engen Austausch mit der lokalen Gemeinde. Studien zufolge sind aber in der Vergangenheit Umsiedlungen mit unzureichenden Ersatz- und Entschädigungsmaßnahmen

vorgenommen worden, mit teils erheblichen negativen Folgen für die Lebensgrundlage der betroffenen Bevölkerung [44]. Unabhängig davon können auch Konflikte zwischen verschiedenen lokalen Gemeinden entstehen. So kam es in dem zum größten Teil von Rio Tinto betriebenen Schwermineralsand-Lagerstätte in Südafrika, Richards Bay, über mehrere Jahre zu gewalttätigen Konflikten zwischen verschiedenen lokalen Gemeinden und Mitarbeitenden des Abbaubetriebes. Obwohl die Region Berichten zufolge stark von den durch den Bergbau geschaffenen Arbeitsplätzen und Infrastrukturen profitiert, gibt es seit 2016 immer wieder schwere Auseinandersetzungen und z. T. tödliche Übergriffe auf Mitarbeitende [45; 46]. Der Betrieb wurde daher bereits mehrere Male z. T. über einige Monate hinweg unterbrochen und auch Schulschließungen in der Region angeordnet, um die Sicherheit der Betroffenen zu gewährleisten. Auch in anderen Ländern, wie z. B. im Senegal (Niarafang Projekt), sind gewalttätige Konflikte in Verbindung mit Schwermineralsand-Abbau Tätigkeiten bekannt.

Der Abbau von Titan aus Schwermineralsanden greift daher insbesondere in den weniger entwickelten Ländern aufgrund seiner verhältnismäßig hohen Flächeninanspruchnahme z. T. stark in die Lebensgrundlage der Menschen ein und kann neben positiven Aspekten auch viel Konfliktpotenzial beinhalten. Einen aktuellen und umfassenden Überblick über die diversen Konflikte, die weltweit in Verbindung mit dem Schwermineralsand-Abbau stehen, liefert die Studie von BISHT UND MARTINEZ-ALIER (2023).

4.3 Governance

In den Ländern, in denen der Abbau von Titanmineralen einen verhältnismäßig großen wirtschaftlichen Beitrag leistet, könnten nachhaltige staatliche Rahmenbedingungen, und damit die Governance des Landes, den positiven Einfluss des Abbaus durchaus fördern. Durch gute Rahmenbedingungen, eine hohe Transparenz, Kompetenz und gute umweltrechtliche

Grundlagen würde von staatlicher Seite so eine Basis für nachhaltigen Abbau geschaffen. Um Aussagen über die Governance auf Länderebene treffen zu können, werden in der Regel die sog. World Governance Indikatoren (WGI) herangezogen [47]. Betrachtet man die WGI der wichtigen Förderländer für Titanminerale, so kommt etwas weniger als 25 % aus Ländern mit schwacher Governance (WGI -1,5 bis -0,5) und etwas mehr als 50 % aus Ländern mit mittlerer Governance (-0,5 bis 0,5). Somit stammt ca. drei Viertel der Produktion aus Ländern mit schwacher bis mittlerer Governance. Auf der Weltkarte in Abbildung 7 sind die Länder und deren WGI-Ranking grafisch dargestellt. Der Resource Governance Index (RGI), der auf die konkrete Betrachtung der Governance im Rohstoffsektor abzielt, steht nur für wenige hier relevante Länder zur Verfügung, sodass ein Vergleich des RGI nicht sinnvoll ist. Einige wenige Länder (insgesamt fünf) sind Teil der Initiative für Transparenz im rohstoffgewinnenden Sektor (engl. Extractive Industry Transparency Initiative, EITI). Bei dreien dieser Länder, Mosambik, Madagaskar und Sierra Leone, handelt es sich allerdings um die Länder mit dem niedrigsten WGI und somit schwacher Governance. Im Rahmen der Validierung der EITI erfüllen alle drei Länder einen Großteil der Anforderungen und deren Fortschritt wird als moderat (Mosambik, Madagaskar) bis zufriedenstellend (Sierra Leone) eingeschätzt.

In Indien sind für den Abbau von Schwermineralsanden in den vergangenen zehn Jahren diverse staatliche Regelungen getroffen und Beschränkungen eingeführt worden. Diese zielten vor allem darauf ab, illegale Abbaupraktiken zu unterbinden. Der illegale Sandabbau wurde in Indien maßgeblich von der sog. Sandmafia organisiert und betrifft neben Sanden für die Bauindustrie v.a. auch Schwermineralsande. Deren illegaler Abbau sollte insbesondere aufgrund des Minerals Monazit eingeschränkt werden. Da Monazit signifikante Konzentrationen an seltenen Erden, Uran und Thorium enthalten kann, wird es von der indischen Regierung als strategisches Mineral

für die Entwicklung der eigenen Atom- und Rüstungsindustrien angesehen, welches nicht in andere Länder exportiert werden darf. Im Zuge der Bekämpfung des illegalen Abbaus hat die Regierung seit 2015 die Lizenzen für private Abbaubetriebe im Land nicht erneuert, sodass der gesamte Schwermineralsand-Abbau nun von der staatlichen Organisation „Indian Rare Earths Limited“ (IREL) sowie Kerala Minerals (KMML) betrieben wird. IREL wiederum ist Teil des „Departments of Atomic Energy“ der indischen Regierung. Aktuelle Berichte zufolge gibt es aber seit 2021 Überlegungen in der Regierung, den privaten Sektor wieder für den Schwermineralsand-Abbau zuzulassen [48]. Der illegale Schwermineralsand-Abbau konnte trotz der Beschränkungen in Indien bisher nicht erfolgreich bekämpft werden. Die vielfältigen negativen Auswirkungen des illegalen Sandabbaus sind u. a. die Schädigung bestehender Ökosysteme an Flüssen und Küsten, das Herabsetzen des Grundwasserspiegels und die Austrocknung von Brunnen sowie die Erhöhung des Risikos für Flutereignisse insbesondere während des Monsuns. Die Umwelt und die in der Umgebung lebende Bevölkerung werden dadurch direkt beeinflusst.

Im Vergleich zu anderen Rohstoffen wie z. B. Zinn gibt es für den Titanmineralabbau keine länder- bzw. firmenübergreifenden Nachhaltigkeitsinitiativen. Nur Rio Tinto ist Mitglied des International Council of Mining and Metals (ICMM) und die Firmen Base Resources, Doral, Eramet, Iluka, Image Resources, Kenmare Resources und Tronox sind über die Zircon Industry Association (ZIA) assoziiert. Die ZIA berichtet auch zu der Nachhaltigkeitsleistung seiner 13 Mitglieder in einem summarischen Bericht anhand von 20 Nachhaltigkeits-Indikatoren (Key Performance Indicators) um Nachhaltigkeitsdaten zu erheben, zu kommunizieren und zu vergleichen. Die vollständigen Daten stehen nur den Mitgliedern zur Verfügung, die sich an der Erhebung beteiligt haben.

Tronox hat zudem von EcoVadis, einem Dienstleister für Nachhaltigkeitsbewertungen, das

Platinum Siegel erhalten. Die Bewertungsmethode basiert dabei auf den Standards der Global Reporting Initiative (GRI), des United

Nations Global Compact (UNGC) und des Leitfadens zur gesellschaftlichen Verantwortung ISO 26000 [49].

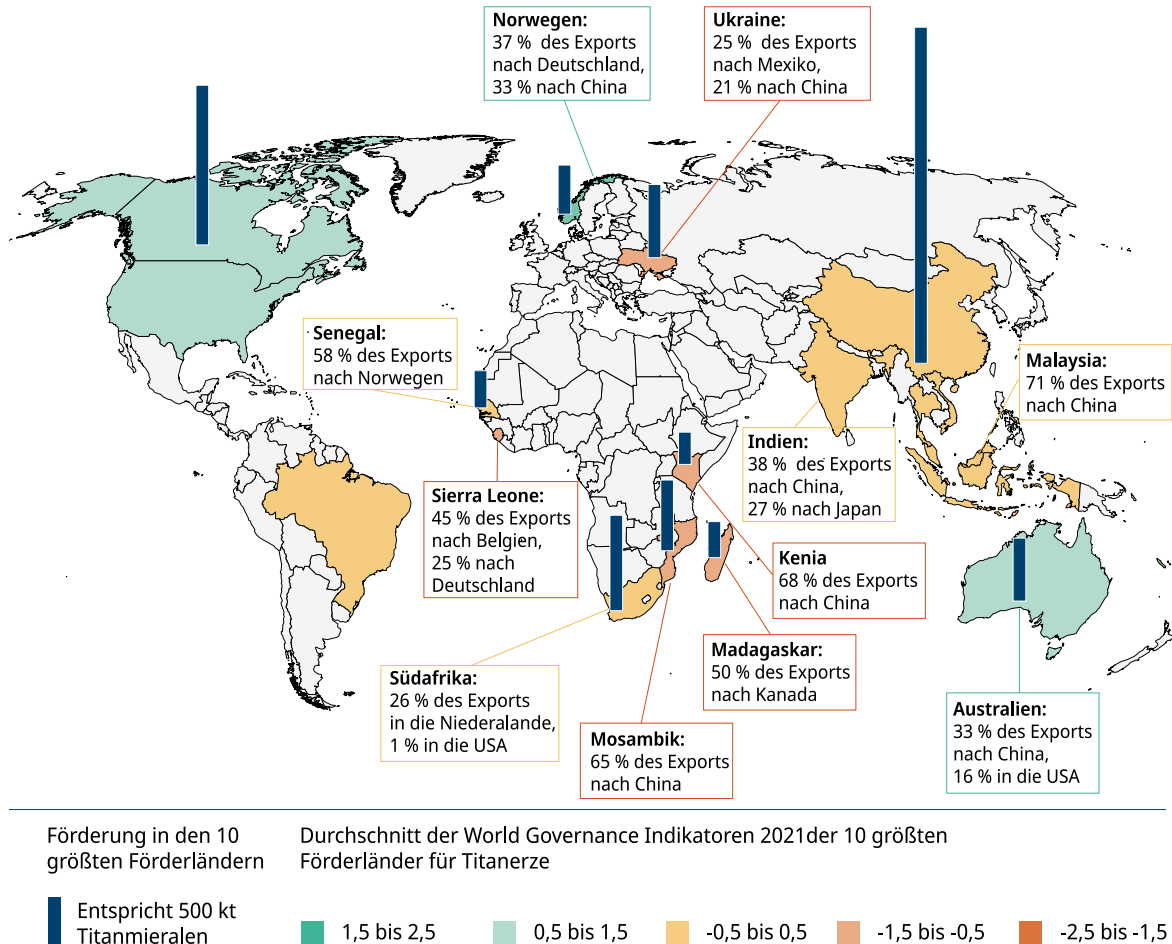


Abb. 7: Governance der Länder, in denen Titanminerale aus Festgesteins- und Schwermineeralsand-Lagerstätten abgebaut werden. Für die zehn wichtigsten Länder ist die Produktionsmenge der Titanminerale (Ilmenit, natürlicher und synthetischer Rutil, Leukoxen) dargestellt. Für Länder, in denen der überwiegende Teil exportiert wird, sind die bedeutendsten Handelspartner angegeben [41].

5 Nachhaltigkeitsaspekte der Weiterverarbeitung

5.1 Umweltaspekte

Die Titanminerale werden wie in Kapitel 2.3 beschrieben je nach Lagerstättentyp und Qualität (TiO_2 -Gehalt) verschiedenen Aufbereitungsprozessen zugeführt. Dabei entstehen je nach Erz und Aufbereitungsprozess verschiedene Nebenprodukte und Reststoffe. Der Energie- und Wasserverbrauch sowie die verursachten Emissionen sind sehr variabel. Wie auch beim Abbau der Titanminerale sind der Energieverbrauch und die Emissionen (in CO_{2e}) stark abhängig vom Ort der Verarbeitung und den dort genutzten dominanten Energiequellen. Zu den wichtigsten weiterverarbeitenden Ländern gehören China, die USA, Deutschland, Japan, Großbritannien, Mexiko und Australien (vgl. Kapitel 2.3).

Grundsätzlich ist die Weiterverarbeitung der Titanminerale weitaus energieintensiver als der Abbau. Je geringer der TiO_2 -Gehalt des gewonnenen Konzentrats desto aufwändiger ist die Weiterverarbeitung hin zu reinem TiO_2 oder Titanmetall. Daher weisen die meist geringer TiO_2 -haltigen Konzentrate aus Festgesteinslagerstätten im Durchschnitt einen größeren CO_2 -Fußabdruck auf und benötigen einen höheren Energieaufwand, als die aus Schwermineralsand-Lagerstätten gewonnenen Konzentrate [12]. Dennoch gibt es hier erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Weiterverarbeitungsstandorten. In Kanada, wo ein Großteil der Energie durch Wasserkraft gewonnen wird, entstehen bei der Produktion von 1 t Titanschlacke (inkl. Pig Iron) aus Festgesteins-Ilmenit ca. 0,73 t CO_{2e} . In Südafrika (Richards Bay Minerals) entstehen bei der Produktion von 1 t Titanschlacke (inkl. Pig Iron) aus Schwermineralsand-Ilmenit ca. 1,91 t CO_{2e} , da dort ein Großteil der Energie durch Kohlekraft gewonnen wird. Für die Produktion von synthetischem Rutil existieren nur wenige, stark voneinander

abweichende Informationen zum Energie und Wasserverbrauch sowie den damit verbundenen Emissionen.

Bei den verschiedenen Prozessschritten fallen sowohl Nebenprodukte als auch Reststoffe an [15]. Die Produktion von Titanschlacke ist dabei der Prozess, bei dem der größte Teil (bis zu 90 %) des im Ilmenit assoziierten Eisens in Form von Pig Iron gewonnen werden kann. Bei der Reduktion des Ilmenits zu synthetischem Rutil mittels Benilite Prozess können Eisenchloride als Nebenprodukte anfallen, die z. B. in der Abwasseraufbereitung eingesetzt werden. Bei der Produktion synthetischen Rutils im sog. Becher Prozess entsteht ein feines Eisenoxid-Hydroxid-Gemisch, welches lediglich verfüllt wird. Titanschlacke und synthetischer Rutil werden dann mittels Sulfat- oder Chloridverfahren zu TiO_2 weiterverarbeitet. Im Chloridverfahren fallen im Durchschnitt etwas weniger Abfälle an, als im Sulfatverfahren (jeweils 1,25 t und 0,5-5 t pro t TiO_2). Die Größenordnung ist jedoch vergleichbar. Im Sulfatverfahren können einige der anfallenden Stoffströme anderen Anwendungen zugeführt werden, während die beim Chloridverfahren produzierten Abfälle (eine Mischung aus Metalloxychloriden, Koks und nicht reagiertem Erz) i. d. R. deponiert werden. Beim Sulfatverfahren fällt zum einen Eisen-(II)-sulfathydrat (Copperas) an, welches u. a. in der Abwasserreinigung, als Düngemittel oder zur Entschwefelung zum Einsatz kommen kann. Zum anderen entsteht verdünnte Schwefelsäure (auch Dünnsäure), die heute entweder aufkonzentriert, gereinigt und wiederverwendet, oder mit Calciumsulfat neutralisiert wird. Bei der Neutralisation entsteht der sog. Titanogips, der bisher allerdings nur in geringen Mengen in der Gipsindustrie Anwendung findet. Im Sulfatverfahren ist die Produktion der Nebenprodukte ein integraler Teil des Prozesses. Nichtsdestotrotz müssen dabei größere Mengen an

Ressourcen eingesetzt werden als im Chloridverfahren. Bei letzterem gehen allerdings je nach Einsatzstoff ca. 0,1 – 0,7 t Eisen pro t TiO_2 im Abfallstrom verloren. Die im Sulfatverfahren anfallende Dünnsäure wurde bis in die 1990er Jahre zu großen Teilen ins Meer eingeleitet, was zu einer erheblichen Umweltverschmutzung führte. Seit die sog. Dünnsäureverklappung weltweit eingestellt wurde und die Neutralisation bzw. Wiederverwendung der Säure stattfindet, sind die Kosten und der Ressourceneinsatz des Sulfatverfahrens überall auf der Welt stark gestiegen. Über längere Zeit hat daher die Anwendung dieses Verfahrens abgenommen. Seit in China die Kapazitäten für den Titanmineralabbau und die TiO_2 -Produktion steigen, nimmt die Anwendung des Sulfatverfahrens allerdings wieder zu. Der „cradle-to-gate“-Energieverbrauch von Sulfat- und Chloridverfahren unterscheidet sich im Durchschnitt geringfügig mit jeweils 70 – 100 GJ/t TiO_2 und 100 – 110 GJ/t TiO_2 .

Die Produktion von Titanmetall mittels Kroll Prozess ist, wie auch die Produktion von metallischem Aluminium, ein sehr energieintensives Verfahren. Die wichtigsten Produktionsländer sind dabei China und Japan (vgl. Kapitel 2.3). Betrachtet man den Energieaufwand vom Abbau bis hin zum Metall, so wird der Großteil an Energie für die Elektrolyse des Magnesiums (als Teilprozess bei der Titanmetallgewinnung) und für das Schmelzen der Titanschlacke verwendet. Für die Produktion von 1 t Titanmetall werden so in Australien ca. 361 GJ/t benötigt (Produktion aus Schwermineralsand-Abbau), in China sind es ca. 423 GJ/t (Produktion aus Festgesteinsabbau) [50; 51]. Bei der Produktion des Titanschwamms fallen zum einen Rückstände mit hohen Eisenverunreinigungen (ca. 10 – 20 % des Titanschwamms) an, zum anderen entstehen bei der weiteren Bearbeitung der fertigen Barren hochtitanhaltige Schrotte oder Späne. Wie in Kapitel 3 beschrieben, wird ein großer Teil dieser Rückstände aber wieder- oder weiterverwertet, sodass das Abfallaufkommen der Titanmetallproduktion verhältnismäßig gering ist.

Die Produktion von Titanschlacke und synthetischem Rutil steht in einigen Ländern wie China, Südafrika, Australien, Norwegen und Kanada im direkten Zusammenhang mit dem Titanmineralabbau. Konflikte wie z. B. in Südafrika (Richards Bay Minerals) stehen daher oft sowohl mit dem Abbau also auch mit der Weiterverarbeitung in Verbindung.

5.2 Soziale und sozioökonomische Bedeutung

Die Weiterverarbeitung des Titans ist in einigen Ländern bis zu einer gewissen Prozessstufe z. T. direkt mit dem Titanmineralabbau verbunden, sodass sich die soziale und sozioökonomische Bedeutung der Weiterverarbeitung nur schwer von der des Bergbaus trennen lässt. Dort wo Titanminerale in Titanschlacke oder synthetischen Rutil weiterverarbeitet werden, verbleibt ein größerer Teil der Wertschöpfungskette im Land und trägt so einen größeren Teil zur Wirtschaft des Landes bei. In einigen wichtigen Abbauländern werden die Mineralkonzentrate direkt exportiert, sodass sich die weitere Wertschöpfung ins Ausland verlagert. Da China aktuell die größten Produktionskapazitäten von TiO_2 und Titanmetall besitzt ist es der weltweit größte Importeur von Titanmineralkonzentraten [18]. Aus den Daten des Global Trade Trackers [41] geht hervor, dass etwa zwei Drittel der exportierten Titanmineralkonzentrate aus Mosambik und Kenia nach China gehen. Auch ein Drittel der Gesamtexporte Australiens werden nach China exportiert. China ist zudem der wichtigsten Handelspartner für Vietnam, Brasilien, Sri Lanka, Indien, Malaysia und die USA. Das in Madagaskar gewonnene Konzentrat wird zu > 50 % nach Kanada exportiert und dort zu Titanschlacke weiterverarbeitet. Für Sierra Leone sind Belgien und Deutschland die wichtigsten Exportländer, während die Konzentrate aus dem Senegal zu einem Großteil nach Norwegen und in die USA exportiert werden. Aus Südafrika gehen ca. ein Viertel der Exporte in die Niederlande aber auch jeweils > 15 % in die USA und nach China. In den Niederlanden und Belgien fungieren Rotterdam und Ant-

werpen als wichtige Importhäfen für Europa, in Rotterdam befindet sich zudem auch ein Pigmentwerk von TRONOX. Norwegen exportiert Titanminerale zu einem überwiegenden Teil nach Deutschland (ca. 37 %) und China (ca. 33 %). Insbesondere in den besonders armen Abbauländern mit geringem WGI wie Mosambik, Madagaskar, Sierra Leone und Kenia endet die Wertschöpfungskette mit dem Abbau der Minerale. In Mosambik werden nur von einigen Produzenten verkaufsfähige Konzentrate produziert. Oft werden auch nur Vorkonzentrate exportiert, die z. B. in China weiter separiert werden. Die größte Wertschöpfung liegt bei Titan in der Weiterverarbeitung zu TiO_2 bzw. Titanschwamm und metallischem Titan. Beispielsweise wurden laut Global Trade Tracker [41] im Jahr 2022 Titanerze aus dem Senegal zu einem Preis von durchschnittlich 0,31 €/kg nach Norwegen exportiert. Das in Norwegen produzierte TiO_2 wurde dann zu durchschnittlich 1,91 – 3,65 €/kg exportiert was einer 6 bis 12-fachen Wertsteigerung entspricht. Titanschwamm (unbehandelt) und Waren aus Titan wurden aus China zu jeweils durchschnittlich 8 €/kg und 25 €/kg exportiert. Die Weiterverarbeitung benötigt aber natürlich die entsprechende Infrastruktur und ist, insb. bei der Herstellung von Titanmetall, sehr energieintensiv. In vielen Abbauländern besteht daher nicht die Möglichkeit die gesamte Wertschöpfungskette zu integrieren.

5.3 Governance

Ein großer Teil (> 80 %) der Weiterverarbeitung von Titanmineralen zu TiO_2 findet in Ländern mit mittlerer bis guter Governance statt. Dazu zählen China, die USA, Deutschland, Japan, Großbritannien, Australien, Saudi-Arabien, Kanada, Indien und Kasachstan. Lediglich Mexico, die Ukraine und Russland haben einen schlechten WGI. Der überwiegende Teil der Titanschwammproduktion entfällt auf Länder mit mittlerer Governance, wie China, Kasachstan, Saudi-Arabien und Indien, und schlechter Governance, wie Russland und die Ukraine. Lediglich Japan hat einen guten WGI. In China

wird Titanschwamm unter anderem in der Provinz Xinjiang hergestellt, wo gegen die chinesische Zentralregierung Vorwürfe schwerwiegender Menschenrechtsverletzungen bestehen. Dazu zählen Inhaftierung, Folter, sexualisierte Gewalt, Zwangsumsiedelung und Zwangsarbeit gegen Uigurische und andere muslimische Minderheiten. Unternehmen, die in Xinjiang produzieren wird vorgeworfen, direkt oder indirekt von einem umfassenden System staatlich geförderter Zwangsarbeit zu profitieren, sodass die EU ähnlich wie die USA plant, ein Einfuhrverbot von Produkten aus Zwangsarbeit umzusetzen [52; 53].

Einige der großen TiO_2 produzierenden Unternehmen, darunter Chemours, TRO-NOX, KRONOS, Venator, Tayca und die LB Group sind Mitglieder der Titanium Dioxide Manufacturers Association (TDMA). Innerhalb dieses Verbandes arbeiten die Mitglieder daran den „Responsible Care Code“ in ihren Unternehmen umzusetzen [54]. „Responsible Care®“ ist eine freiwillige Initiative der chemischen Industrie, die ihre Partner dazu anhält, deren Aktivitäten in allen Bereichen der Nachhaltigkeit zu verbessern und anzupassen [55]. Einige der Unternehmen (TRONOX, KRONOS, Chemours,) haben zudem selbst initiierte Zertifizierungen durch EcoVadis (siehe Kapitel 4.3) für ihr Nachhaltigkeitsmanagement und ihre Leistung im Bereich der Nachhaltigkeit erhalten. Das Umweltmanagement der Unternehmen wird meist mit der entsprechenden ISO-Norm zertifiziert (ISO 14001). Aus eigener Initiative sind einige der Unternehmen zudem Mitglieder der Responsible Minerals Initiative (TRONOX) oder halten sich an die Berichterstattungsstandards der GRI (Venator).

Länder- und/oder firmenübergreifende Nachhaltigkeitsinitiativen oder Standardisierung im Bereich der Titanmetallindustrie sind nach aktuellem Kenntnisstand bisher nicht etabliert. Die „International Titanium Association“ macht keinerlei Angaben zu Themen der Nachhaltigkeit.

6 Quellennachweis

- [1] ELSNER, H. (2021): The HiTi feedstock market – rutile, leucoxene and others – DERA Rohstoffinformationen 47. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-47-en.pdf [Stand: 27.04.2021]
- [2] USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2022): Mineral commodity summaries 2022: S. 178 ff. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf> [Stand: 31.01.2022]
- [3] HAIDER, A. J., JAMEEL, Z. N. & AL-HUSSAINI, I. H. M. (2019): Review on: Titanium Dioxide Applications. – Energy Procedia 157, 17-29. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.159> [Stand: 25.01.2019]
- [4] ELSNER, H. (2010): Heavy minerals of economic importance: assessment manual. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. – URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/heavy-minerals-economic-importance.html [Stand: 13.10.2011]
- [5] HOU, B., KEELING, J. & VAN GOSEN, B. S. (2017): Geological and Exploration Models of Beach Placer Deposits, Integrated from Case-Studies of Southern Australia. – Ore Geology Reviews 80, S. 437-459. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.016> [Stand: 25.07.2016]
- [6] VAN GOSEN, B. S., FEY, D. L., SHAH, A. K., VERPLANCK, P. L. & HOEFEN, T. M. (2014): Deposit model for heavy-mineral sands in coastal environments. – United States Geological Survey Scientific, Investigations Report, S. 51. – URL: <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070L> [Stand: 21.07.2022]
- [7] WOODRUFF, L. G., BEDINGER, G. M. & PIATAK, N. M. (2017): Titanium – in: K. J. Schulz, J. J. H. De-Young, R. R. Seal II & D. C. Bradley (Eds.): Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply. – URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802T> [Stand: 19.12.2017]
- [8] USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2023): Minerals yearbook 2020: Titanium □ advance data release. – URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/titanium-statistics-and-information> [Stand: 06.04.2023]
- [9] JONES, G. (2009): Mineral Sands Technical Information. Iluka Resources. – URL: https://iluka.com/media/w2klnfof/iluka_technical_brochure_07_12_09.pdf [Stand: 14.11.2022]
- [10] RIO TINTO LTD. (2021): Rio Tinto Annual Report 2021. – URL: <https://www.riotinto.com/en/invest/reports/annual-report> [Stand: 05.1.2023]
- [11] CHARLIER, B., NAMUR, O., BOLLE, O., LATYPOV, R. & DUCHESNE, J.-C. (2015): Fe-Ti-V-P ore deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosites and related rocks. – Earth -Science Reviews 141, S. 56-81. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.005> [Stand: 20.11.2014]
- [12] PERKS, C., MUDD, G. M. & CURRELL, M. (2022): Using corporate sustainability reporting to assess the environmental footprint of titanium and zirconium mining. – The Extractive Industries and Society 9, 101034. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101034> [Stand: 30.12.2021]
- [13] GUÉGUIN, M. & CARDARELLI, F. (2007): Chemistry and mineralogy of titania-rich slags. Part 1—Hemo-ilmenite, sulphate, and upgraded titania slags. – Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 28, S. 1-58. – URL: <https://doi.org/10.1080/08827500600564242> [Stand: 31.01.2007]

- [14] CHERNET, T. (1999): Mineralogical and textural constraints on mineral processing of the Koivusaarenneva ilmenite ore, Kälviä, western Finland. – International Journal of Mineral Processing 57, S. 153-165. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00015-0) [Stand: 26.07.1999]
- [15] FILIPPOU, D. & HUDON, G. (2009): Iron removal and recovery in the titanium dioxide feedstock and pigment industries. JOM 61, 36-42. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11837-009-0150-3> [Stand: 15.10.2009]
- [16] McNULTY, G. (2007): Production of titanium dioxide. – Proceedings of NORM V international conference, Seville, Spain. – URL: https://ena-norm.eu/wp-content/uploads/2018/03/V_pl_3.pdf [Stand: 02.08.2022]
- [17] NAGESH, C. R., RAMACHANDRAN, C. & SUBRAMANYAM, R. (2008): Methods of titanium sponge production. – Transactions of the Indian Institute of Metals 61, S. 341-348. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12666-008-0065-7> [Stand: 28.01.2012]
- [18] USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2023): Mineral commodity summaries 2023. S. 184-187. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf> [Stand: 31.01.2023]
- [19] HELBIG, C. (2013): Kritikalität der technischen Nutzung und dissipative Entsorgungspotentiale. – Masterarbeit der Universität Augsburg. – URL: https://www.researchgate.net/publication/267024530_Titandioxid_-_Kritikalitat_der_technischen_Nutzung_und_dissipative_Entsorgungspotentiale [Stand: 25.10.2023]
- [20] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2022): Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0474> [Stand: 18.01.2023]
- [21] UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2011): Recycling Rates of Metals-A Status Report. - A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. – URL: <https://www.unep.org/resources/report/recycling-rates-metals-status-report> [Stand: 06.06.2011]
- [22] TAKEDA, O., OUCHI, T. & OKABE, T. H. (2020): Recent Progress in Titanium Extraction and Recycling. – Metallurgical and Materials Transactions B 51, S. 1315-1328. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01898-6> [Stand: 07.07.2020]
- [23] FARJANA, S. H., HUDA, N., MAHMUD, M. A. P. & LANG, C. (2018): Towards sustainable TiO₂ production: An investigation of environmental impacts of ilmenite and rutile processing routes in Australia. – Journal of Cleaner Production 196, S. 1016-1025. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.156> [Stand: 15.06.2018]
- [24] ILUKA RESOURCES LTD. (2020): Iluka Sustainability Report 2020. – URL: <https://iluka.com/getattachment/93e3cbf9-62d4-4186-9bf8-14dcb91989ac/2020-sustainability-report.aspx> [Stand: 18.10.2022]
- [25] ILUKA RESOURCES LTD. (2020): Iluka Annual Report 2020. – URL: <https://iluka.com/getattachment/e75f44fd-7fe4-4559-8f38-f5c13918c074/2020-annual-report-including-appendix-4e.aspx> [Stand: 18.10.2022]
- [26] CARVALHO, F. P. (2017): Mining industry and sustainable development: time for change. – Food and Energy Security 6, S. 61-77. – URL: <https://doi.org/10.1002/fes3.109> [Stand: 09.06.2017]
- [27] BISHT, A. & MARTINEZ-ALIER, J. (2023): Coastal sand mining of heavy mineral sands: Contestations, resistance, and ecological distribution conflicts at HMS extraction frontiers across the world. – Journal of Industrial Ecology 27, S. 238-253. – URL: <https://doi.org/10.1111/jiec.13358> [Stand: 27.10.2022]

- [28] ZIA – ZIRCON INDUSTRY ASSOCIATION (2022): Environmental, Social and Governance (ESG) – Zircon Industry Report 2022. – URL: https://www.zircon-association.org/assets/files/KnowledgeBank/ZIA_ESG-Industry-Report-2022.pdf [Stand: 26.07.2023]
- [29] EMERMAN, S. H. (2020): Evaluation of a New Water-Quality Study of the Rio Tinto QMM Ilmenite Mine, Southeastern Madagascar. – Report eingereicht beim Andrew Lees Trust. – URL: http://www.andrewleestrust.org/blog/wp-content/uploads/2020/11/ALTUK_Evaluation-of-JBSG-Water-Report_by-Dr-S-Emerman_2020_Revised.pdf [Stand: 02.03.2023]
- [30] ORENGO, Y. (2022): The mine, the dead fish, the villagers and their protests. – Ecologist. – URL: <https://theecologist.org/2022/may/27/mine-dead-fish-villagers-and-their-protests> [27.05.2022]
- [31] WSP CANADA INC. (2014): Waste Rock and Water Management at the Tio Mine – Summary of the Project Description. – Report für Rio Tinto Fer et Titane, S. 29. – URL: <https://minedocs.com/21/RTFT-Lac-Tio-June-2014.pdf> [Stand: 12.04.2023]
- [32] PLANTE, B., BUSSIÈRE, B. & BENZAAZOUA, M. (2014): Lab to field scale effects on contaminated neutral drainage prediction from the Tio mine waste rocks. – Journal of Geochemical Exploration 137, S. 37-47. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.11.004> [Stand: 23.10.2013]
- [33] TOUBRI, Y., PLANTE, B., DEMERS, I. & FILLION, M. (2022): Probing cleaner production opportunities of the Lac Tio pyrite-enriched tailings generated to alleviate sulfur dioxide emissions. – Journal of Cleaner Production 357, 132027. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132027> [Stand: 02.05.2022]
- [34] CORNWALL, N. (2013): Submarine tailings disposal in Norway's fjords: Is it the best option? – Masterarbeit des International Institute for Industrial Environmental Economics. – URL: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/4076704> [Stand: 20.02.2023]
- [35] STERRI, H. E. (2017): Transport of metals from mine waste-evaluation of ongoing and future mine deposits at Titania AS. – Masterarbeit der University of Oslo. URL: <https://www.duo.uio.no/handle/10852/59290> [Stand: 20.02.2023]
- [36] DIMECH, A. (2018): Imagerie de l'écoulement de l'eau dans une halde à stériles expérimentale par tomographie 3D de résistivité électrique. – Masterarbeit der École Polytechnique de Montréal. – URL: <https://publications.polymtl.ca/3195/> [Stand: 21.02.2023]
- [37] EITI – EXTRACTIVE INDUSTRY TRANSPARENCY INITIATIVE (2021): SLEITI – Sierra Leone Extractive Industry Transparency Initiative Report 2019, S.15 ff. – URL: <http://www.sleiti.gov.sl/index.php/reports-and-documents/sleiti-reports/seiti-report-2019-pdf-format> [Stand: 22.03.2023]
- [38] EITI – EXTRACTIVE INDUSTRY TRANSPARENCY INITIATIVE MADAGASCAR (2022): Rapport Assoupli 2019 – 2020. – URL: https://eiti.org/sites/default/files/2022-07/EITI_Rapport%20assoupli%20FY19-20_%20v30062022.pdf [Stand: 22.03.2023]
- [39] EITI – EXTRACTIVE INDUSTRY TRANSPARENCY INITIATIVE (2022): Independent Report of the Extractive Industry Transparency Initiative Year: 2020 Mozambique. – URL: https://eiti.org/sites/default/files/2023-01/ITIE%20Moc%CC%A7ambique_10o%20Relato%CC%81rio_ENG_1.pdf [Stand: 22.03.2023]
- [40] EITI – EXTRACTIVE INDUSTRY TRANSPARENCY INITIATIVE (2022): Initiative pour la Transparence dans les Industries Extractives au Sénégal Rapport ITIE Semestre 1 2022. – URL: https://eiti.org/sites/default/files/2023-01/Rapport-Semestre-1-2022-22122022_0.pdf [Stand: 22.03.2023]
- [41] ZEN INNOVATIONS AG (2023): Global Trade Tracker. – Kostenpflichtige Datenbank. . URL: <https://www.globaltradetracker.com/> [Stand: 04.2023]

[42] BASE RESOURCES LTD. (2022): Sustainability Report 2022. – URL: <https://s3-ap-south-2.amazonaws.com/assets.base-resources.com.au/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/18072921/2022-Sustainability-Report.pdf> [Stand: 03.04.2023]

[43] KENMARE RESOURCES PLC (2021): Responsibly meeting global demand for Quality of Life minerals - 2021 Sustainability Report. – URL: <https://www.kenmareresources.com/application/files/2216/4986/5516/34009-Kenmare-Resources-SR-2021.pdf> [Stand: 03.04.2023]

[44] NAVARRA, C. & RODRIGUES, C. U. (2021): Transformations of Rural Spaces in Mozambique. – Africa Now, Bloomsbury Publishing. – URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1604798/FULLTEXT01.pdf> [Stand: 10.02.2022]

[45] TLOUBATLA, M. A. (2020): The role of Richards Bay Minerals (RBM) on the sustainable local economic development of KwaMbonambi and Sokhulu communities. – Masterarbeit an der University of Kwazulu-Natal. – URL: https://researchspace.ukzn.ac.za/bitstream/handle/10413/20521/Tlobatla_Makitimela_Anthony_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Stand: 11.09.2020]

[46] MAKHAYE, C. (2021): Mining in Richards Bay remains a double-edged sword. – New Frame. – URL: <https://www.newframe.com/mining-in-richards-bay-remains-a-double-edged-sword/> [Stand:29.03.2023]

[47] WORLD BANK GROUP (2021): World Governance Indicators. – URL: <http://info.worldbank.org/governance/wgi/> [Stand: 03.04.2023]

[48] DUTTA, A. (2021): Five years of curbs later, Govt keen to open beach sand minerals mining. – The Indian express. – URL: <https://indian-express.com/article/india/sand-minerals-mining-modi-govt-private-sector-7585816/> [Stand: 06.04.2023]

[49] TRONOX (2021): Tronox Receives Platinum Rating from EcoVadis for Sustainability Performance. – Pressemitteilung. – URL: <https://www.tronox.com/tronox-receives-platinum-rating-from-ecovadis-for-sustainability-performance/> [Stand: 04.04.2023]

[50] NORGATE, T. E., JAHANSHAHI, S. & RANKIN, W. J. (2007): Assessing the environmental impact of metal production processes. – Journal of Cleaner Production 15, S. 838-848. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018> [Stand: 18.09.2006]

[51] GAO, F., NIE, Z., YANG, D., SUN, B., LIU, Y., GONG, X. & WANG, Z. (2018): Environmental impacts analysis of titanium sponge production using Kroll process in China. – Journal of Cleaner Production 174, S. 771-779. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.240> [Stand: 11.10.2017]

[52] EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE (2023): Proposal for a ban on goods made using forced labour. – URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/739356/EPRS_BRI\(2023\)739356_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/739356/EPRS_BRI(2023)739356_EN.pdf) [Stand: 11.07.2023]

[53] U.S. CUSTOMS BORDER PROTECTION (2023): Uyghur Forced Labor Prevention Act. – URL: <https://www.cbp.gov/trade/forced-labor/UFLPA> [Stand: 11.07.2023]

[54] TDMA (2023): Responsible care and the TiO₂ industry. – Pressemitteilung – URL: <https://www.tdma.info/sustainability/responsible-care/> [Stand: 12.04.2023]

[55] CEFIC (2023): Responsible Care - An ethical framework towards safe chemicals management and performance excellence. – Unternehmenswebseite: – URL: <https://cefic.org/responsible-care/> [Stand: 12.04.2023]

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Mineralische-Rohstoffe@bgr.de

