Die Vergleichbarkeit von technischen und geologischen Erosionsprozessen

Dr. Helmut Riegger, VAUTID GmbH, Ostfildern

1. Einleitung

Verschleiß in technischen Prozessen bedeutet den fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers. Hervorgerufen wird dieser Materialverlust durch mechanischen Abtrag als Folge von Kontakt mit entweder festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen oder auch als Folge von Kontakt mit einer Mischung aus Stoffen unterschiedlicher Aggregatzustände. Diese Verschleißvorgänge werden auch Erosion genannt, da sie sich durch das Loslösen von kleinen Teilchen, den sog. Verschleißpartikeln, äußern und eine Formänderung der Oberflächenschicht bewirken. Bei allen Erosionsprozessen an metallischen Bauteilen ist eine mechanisch eingeleitete Energie unterschiedlicher Stärke die wesentliche Ursache [1,2].

Diese Ursache gilt auch für geologische Erosionsprozesse, bei denen die Erdoberfläche durch linear wirkende Abtragung ebenfalls in ihrer Form und Oberfläche verändert wird. Wie in technischen Prozessen bilden sich Rippel, Vertiefungen, Täler oder flächenhafte Abtragungen durch Erosionsarbeit des Windes, des fließenden Wassers oder des abrasiv wirkenden Eises [3].

Eine Vergleichbarkeit von technischen und geomorphologischen Vorgängen drängt sich auf, wenn man die erodierten Oberflächen von verschlissenen Maschinenelementen mit der Form und Oberfläche von Landschaften, Gesteinsformationen und Wüsten vergleicht. Bild 1 zeigt eine makroskopische Aufnahme eines offenen, axial wirkenden Slurrypumpenlaufrades mit einem Durchmesser von 800 mm, das nach einjährigem Einsatz in der Schlammförderung (Wasser-Sand-Gemisch) typische Dünenstrukturen und einen kapitalen Durchbruch einer Laufradschaufel aufweist.

Bild 1 Verschlissenes Laufrad einer Axialpumpe mit Auswaschungen und kapitalem Durchbruch aufgrund von Wasser – Feststoff – Förderung

Bild 2 Der Sesriem Canyon in der Namib Wüste entstand durch Erosionsarbeit des periodisch fließenden Wassers

In Bild 2 ist der geologische Vergleich dargestellt: Ein oszillierend auftretender Wasserstrom gräbt sich in Gesteinskonglomerat bis zum sprunghaft auftretenden Durchbruch zur Schlucht mitten in der Wüste [4].

Bei aller Vergleichbarkeit ist natürlich die Dauer der beiden Erosionsprozesse der grundsätzliche Unterschied: Geologische Erosion geschieht in Millionen von Jahren mit allen zusätzlichen Einflüssen der Verwitterung und Verwerfung [5]. Erosion in technischen Prozessen erfolgt sehr oft in wenigen Wochen oder Monaten; auf Grund der gewollten Effizienz einer Maschine ist die eingebrachte Energie so groß, dass selbst bei härtestem Material erste Erosionserscheinungen schon nach wenigen Stunden zu sehen sind.

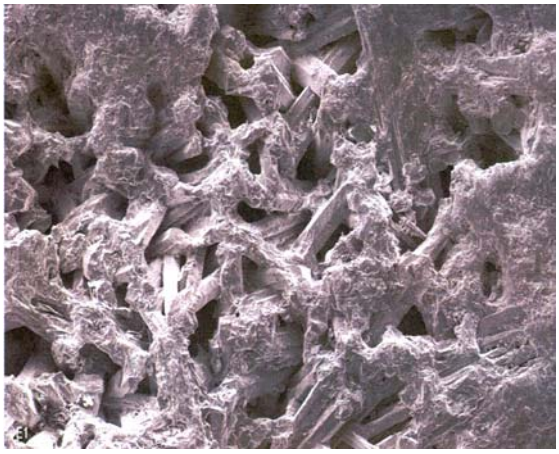

Bild 3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Verschleißoberfläche aus hexagonalen Chromkarbidnadeln und ausgewaschener austenitischer Matrix

Bild 4 Konglomerat aus gerundetem Kiesel und weichem Sandstein, Sedimentgestein

In den Bildern 3 und 4 sind die Gefügestrukturen eines metallischen Verschleißwerkstoffs sowie die Zusammensetzung des Gesteins wiedergegeben. Beide Mikrostrukturen sind heterogen: Das Gefüge des Metallgusses besteht aus primären austenitischen Kristallen in einer eutektischen Matrix aus Chromkarbiden und Austenit. Die Chromkarbide bilden die Hartstoffe des so genannten weißen Gusseisens und anderer verschleißresisteter Werkstoffe. Verschleiß greift zuerst in der weicheren Matrix an und wäscht die resistenteren Hartstoffe frei (Bild 3). Im Falle der durch Tiefenerosion entstandenen Schlucht besteht das Gestein aus Sedimenten; es tritt gerundeter Schutt in weichem Sandstein als Konglomerat zutage. Die Morphologie des Konglomerats ähnelt dem Gefüge des metallischen Gusses, der in Pumpenlaufrädern verwendet wird: harte Quarzkiesel in relativ weicher Sandablagerung (Bild 4). Durch Vorschädigung, extreme einseitige Belastungen und Auswaschungen kommt es in beiden Fällen zu tiefen Einschnitten: das Laufrad einer Schlammpumpe ist nach 12 Monaten des Einsatzes katastrophal zerstört (Bild 1), das wesentlich weichere Sedimentgefüge wurde in vielen tausend Jahren zur Schlucht ausgehöhlt (Bild 2).

2. Die Erosionsarbeit des Windes und Verschleiß in Ventilatoren

Während die reine Luftbewegung durch Wind kaum eine zerstörende Wirkung auf Gestein oder Maschinenbauteile ausüben kann, ändert sich dies schnell, wenn der Wind große Mengen feinen Sandes oder wie im Ventilator feinen Mineralstaub mit sich führt. Ventilatoren werden bei der Zementherstellung zum Transport von feinen Pulverpartikeln oder im Kraftwerk zum Transport von Kohlestaub mit Hilfe des erzeugten Luftstromes eingesetzt. Die Sandkörnchen oder Pulverpartikel wirken zusammen mit der Windkraft oder dem erzeugten Luftstrom wie ein Sandstrahlgebläse und sind imstande einzelne Erosionspartikel aus dem Stein oder aus dem metallischen Bauteil herauszulösen und fortzutragen. In der Geologie wird dieser Prozess als Windschliff bezeichnet, in der Verschleißtechnik nennt man diesen Vorgang Erosionsverschleiß durch permanente Zerrüttung der Oberfläche.

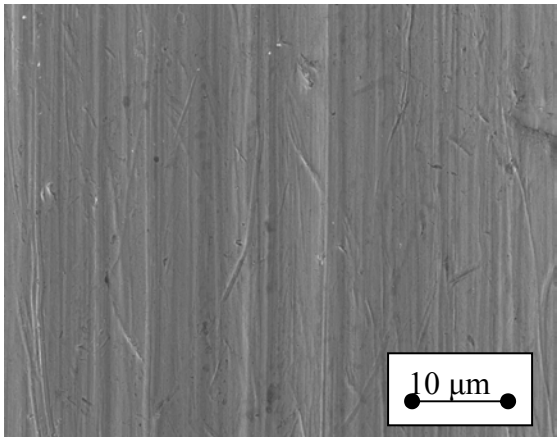

Bild 5 Verschleißbelastete Oberfläche eines homogenen metallischen Werkstoffes, martensitischer Feinkornbaustahl

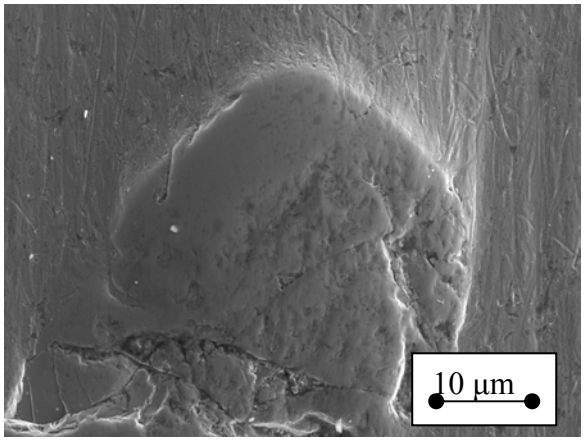

Bild 6 Verschleißbelastete Oberfläche eines heterogenen metallischen Werkstoffes: das härtere Karbid bleibt zunächst erhaben

Transport und Zerstörung wird durch die Windgeschwindigkeit, die Korngröße und die Menge der festen Partikel bestimmt. Wie in allen anderen Erosionsfällen beeinflussen auch das Feingefüge des Gesteins und des Werkstoffes den Verschleiß oder das Ausmaß der Erosion. Trifft der Wind auf ein einphasiges Gefüge (in der Geologie nur Sandstein, in der Metallkunde nur Feinkornbaustahl mit martensitischer Feinstruktur), so entsteht eine glatt geschliffene Oberfläche (Bild 5). Bei mehrphasigem Gestein oder mehrphasigen Materialien werden meist die härteren Phasen freigelegt, da das weichere Material, auch Binderphase genannt, durch die feinen Partikel ausgehöhlt und abtransportiert werden (Bild 6). Handelt es sich bei den härteren Phasen um runde kieselförmige Gebilde, so fallen diese Elemente durch mangelnde Bindung zur Matrix aus, was zu zusätzlicher starker Erosion führt. Besitzen diese Primärphasen eine nadelige oder kantige Struktur, so sind diese ineinander verhakt, sie besitzen eine größere Widerstandskraft gegenüber stetiger Erosion (Bild 3).

Neben dem Glätten von Oberflächen kann der Windschliff auch bizarre Formen aus härtestem Material modellieren. Da Luftströme mit hohen Geschwindigkeiten

eine höhere Partikelfracht als solche mit niederer Geschwindigkeit mit sich führen, entstehen unterschiedliche Abtragsraten, was zu Pilzformationen [4], bizarren Skulpturen und Aushöhlungen (Bild 7), auch an metallischen Oberflächen führen kann. Ventilatoren, die Staubanteile zu befördern haben, werden deshalb aus verschleißbeständigen Verbundplatten hergestellt [6], die aus einem bearbeitbaren Grundwerkstoff und einer verschleißresistenten Deckschicht bestehen. Die Verschleißmechanismen beginnen mit mikroskopischen Aushöhlungen, durch Staubpartikel und Luftstrom verursacht. Bild 8 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von beginnendem Verschleiß durch partielle Materialverluste.

Bild 7 Wind – Sand - erodierte Oberfläche im Sandstein von Twyfelfontein, Namibia

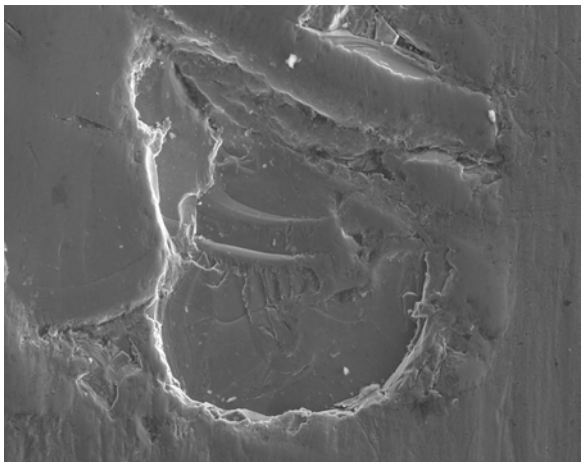

Bild 8 REM – Aufnahme einer verschleiß-belasteten Oberfläche mit Vertiefung durch Wind – Feststoff – Erosion

2.1 Rippelbildung durch Luftströme/Wind

Rippelstrukturen bilden sich immer an der Berührungsfläche von Medien unterschiedlicher Dichte, also bei permanentem Kontakt zwischen Sand und strömender Luft oder zwischen Sand (Feststoffen) und strömendem Wasser. Bei Sand – Wind – Strömungsrippeln lagern sich mitgerissene Sandkörner an einem Hindernis des Sandbodens an. Auf Grund des Hindernisses spaltet sich die Strömung an der höchsten Stelle in eine laminare und eine turbulente Strömung auf. Die Turbulenz führt zur Erosion der Tröge zwischen den Rippeln [7,8]. Das Ergebnis sind asymmetrische Strömungsrippel mit einer flachen Luv- und einer steilen Leeseite (Bild 9). Die Rippelbildung zwischen Feststoffen und Wasser wird in Abschnitt 3 behandelt, die Entstehung ist jedoch ähnlich. Bei Sand – Luft – Kontakt ergeben sich nur geringe Parallelen zur Technik. Eine feste Oberfläche kann mit einer Luftströmung ohne Partikel kaum in Wechselwirkung treten. Fehlstellen oder minimale Erhöhungen, die zur Rippelbildung notwendig sind, gibt es in technischen Erosionsprozessen auch; sie führen allerdings zu stark asymmetrischen Verschleißbildern, wie man in Bild 10 an einer Erosionsfläche sieht, die durch ein Kohle – Luft – Gemisch erzeugt wurde. Der verschleißende Strom verläuft von oben nach unten und erzeugt Erosionsrinnen auf den Rippelkämmen.

Bild 9 Klassische Sandrippel erzeugt durch Wind

Bild 10 Makroskopisches Bild einer Luftstrom – Kohle – belasteten Oberfläche

2.2 Strahlverschleiß

Beim technischen Strahlverschleiß wird mit Druckluft oder einem Schleuderrad ein Strahlmittel (Sand, Korund oder Metallkorn) auf eine Oberfläche geblasen oder geschleudert, meistens zum Zwecke der Entzunderung. Diese Vorgänge sind so energiereich, dass ebenfalls Dünen- oder Rippelbildung an der metallischen Oberfläche entstehen kann. Bild 11 zeigt eine Verschleißplatte, die durch längeres Strahlen mit metallischen Strahlmittel „zerstört“ wurde. Der Strahlwinkel betrug ca. 45º, bei anderen Strahlwinkeln sieht das Verschleißbild der Oberfläche anders aus.

Bild 11 Strahlverschleiß bis zum katastrophalen Versagen mit umgebender Dünenstruktur

3. Die Erosionsarbeit des fließenden Wassers und Verschleiß durch Suspensionen

Aquatische Erosionserscheinungen zeigen sich in allen Maschinen, die Suspensionen mischen, mahlen, fördern oder trennen, wie zum Beispiel Betonmischer, Schlammpumpen oder Zentrifugen. Verschleißmessungen im

Labor können in trockenen oder wässrigen Umgebungen ausgeführt werden: bei fast allen Verschleißtestern zeigt eine Versuchsanordnung mit Wasser eine höhere Verschleißrate als im trockenen Zustand. Die Ähnlichkeit der verschlissenen Oberflächen in den oben genannten Maschinen mit den geologischen Oberflächen, die durch die Erosionsarbeit des Wassers entstanden sind, ist enorm. Es entstehen in Betonmischern und Pumpen dieselben Auswaschungen und Dünenstrukturen durch Verschleiß wie an Stränden oder Wasserfällen.

Bild 12 Rippelbildung an einem Abstreifer durch Wasser – Beton – Gemisch

Bild 13 Rippelbildung am Sandstrand durch oszillierende Wasser – Sand – Strömung

3.1 Rippelbildung durch Wasserströmung

In Bild 12 ist ein Abstreifer aus einem Betonmischer wiedergegeben, der deutliche Rippelbildung durch Wasser – Feststoff - Strömung zeigt. Dieselben Strömungsrippel entstehen an allen Sandstränden dieser Erde (Bild 13). Der physikalische Vorgang entspricht der bereits beim Luftstrom beschriebenen Teilung in turbulente und laminare Strömung.

3.2 Verschleiß durch Wasserbewegung und Erosionsarbeit von Wasserfällen

Die Erosionsarbeit des fließenden Wassers hängt von der Menge und dem Gefälle des Wassers ab, die ihrerseits die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen. Außerdem führt das Wasser in den meisten Fällen Feststoffe mit: Schlamm, Grobsand, feinen Kies und Geröll. Es ist kein Zufall, dass die geschlossenen Laufräder von Schlammpumpen nach verschleißender Arbeit die gleichen Oberflächenstrukturen besitzen wie das Gestein an Wasserfällen. In Bild 14 sieht man die verschlissene Austrittskante von Schaufeln eines Pumpenlaufrades. Die tiefen, regelmäßigen Auswaschungen mit abgerundeter Charakteristik können nur von Erosionsarbeit mit Flüssigkeit stammen. Es besteht ein großer Unterschied zu dem Verschleiß, der im trockenen Zustand durch Wind und Feststoffe entsteht (Bild 10). Im Vergleich hierzu weist das Bild der Erosionsarbeit durch einen periodischen Wasserfall (Bild 15) große Ähnlichkeit mit den

Austrittkanten des Pumpenlaufrades auf. Das stete Fließen „bohrt“ und rundet die Kanten während des Prozesses.

Bild 14 Auslauf eines geschlossenen Radialpumpenlaufrades, verschlissen durch ein Wasser – Feststoff – Gemisch

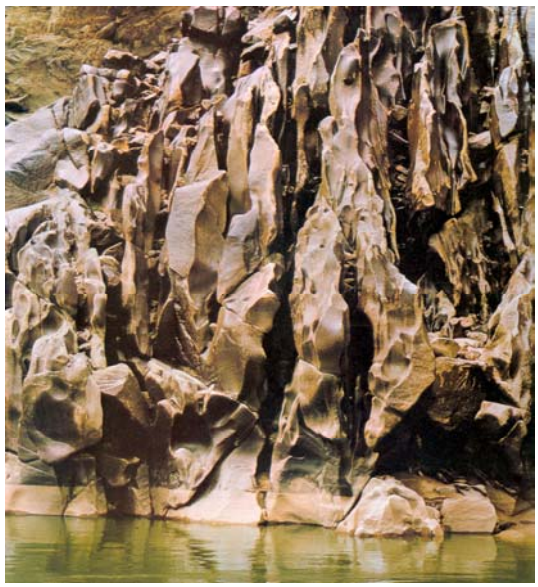

Bild 15 Erosionsverschleiß an einem Sandstein durch fallendes Wasser – Sand – Gemisch

4. Verschleiß in Schleifprozessen und Erosionsarbeit des Eises

Die Erosionsarbeit des Eises kann bis heute in unseren Breitengraden betrachtet werden. Die Reste der Eiszeit sind stark abgeschliffene Kiesel, Steine, ja sogar ganze Gesteinsformationen. Das durch Frost abgesprengte Gestein fällt als Schutt auf das Firnfeld oder den Gletscher. Dieser Abraum wandert als Grundschutt mit dem Gletscher und scheuert, hobelt und schleift das anstehende und mitgeführte Gestein. Bild 16 zeigt die Oberfläche eines abgeschliffenen Findlings einer früheren Eiszeit. Das Gestein ist heterogen, das heißt, es befinden sich Steine unterschiedlicher Härte im Findling. Das Werkzeug „Gletschereis“ hat alles eingeebnet und rund geschliffen. Während das fließende Wasser linear arbeitet, greift der Gletscher wie ein breites Schleifwerkzeug an [3,10]. Dieses breite Schleifwerkzeug ist bei der Steinbearbeitung ebenfalls notwendig. Zur Herstellung von Bodenplatten aus Stein kommen Werkzeuge aus Korund zum Einsatz. Die unterschiedlich harten Bestandteile des Gesteins reagieren entsprechend (Bild 17). Die weichen Bestandteile zeigen eine stärkere Auskolkung beim Schleifprozess als die Hartstoffe [9]. Auch hier besteht eine Vergleichbarkeit zu den bereits im Abschnitt 2 festgestellten Erosionsprozessen in heterogenen Mikrostrukturen.

Bild 16 Oberfläche eines Findlings aus der Eiszeit, heterogenes Gefüge

Bild 17 Oberfläche einer künstlich bearbeiteten Bodenplatte, heterogenes Gefüge

5. Schlussfolgerungen für technische Verschleißlösungen

In Anlehnung an den Begriff der Bionik, also das systematische Lernen von der Natur, stellt sich nun die Frage, welche Schlussfolgerungen sich für technische Verschleißlösungen ergeben.

Da ist zunächst die Vermeidung von turbulenter Strömung, die in allen geologischen Prozessen zu stark erhöhter und immer schneller verlaufender Erosion führt. Auch die Rippelbildung ist ein Zeichen für turbulente Strömungen. Die Folgen sind hierbei das Aushöhlen von „Trögen“ neben dem Verbleib von erhabenen „Spitzen“. Schließlich führt jedes Strömungshindernis zu Turbulenzen und erhöhtem Verschleiß, also ein sich aufschaukelnder Prozess. Eine Verschleiß minimierende Konstruktion ist deshalb wünschenswert und wird von vielen Herstellern von Werkstoffen gegen Verschleiß als Beratung angeboten [1]. Zu dieser Beratung gehört auch der autogene Verschleißschutz, eine sich selbst schützende Konstruktion, die ebenfalls zu verschleißgerechtem Konstruieren gehört. Der autogene Verschleißschutz ist die konstruktive Bildung von „Taschen“ und Vertiefungen, die sich im Verschleißfall zuerst mit dem zu bearbeitenden Stoff füllen und somit den metallischen Konstruktionswerkstoff schützen.

Die Härte des Werkstoffes spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Besitzt ein Massiv eine harte Oberflächenkruste, so bleibt an dieser Stelle das „Gebirge“ erhalten, während die Umgebung systematisch abgetragen wird. Die geologischen Beispiele sind sehr zahlreich, die Erhebung in Bild 6 gibt hierfür den technischen Vergleich durch das Mikroskop betrachtet. Die technischen Lösungen zur Auswahl eines Verschleiß – resistenten Werkstoffes gehen deshalb hauptsächlich von der Härte des Materials aus: Hartguß, verschleißfeste Platten, keramische Werkstoffe und Komposite mit eingelagerten Hartstoffen gehen ausschließlich von der Tatsache aus, dass in einer Verschleißpaarung der härtere Werkstoff längere Standzeiten besitzt.

Die Vermeidung von Feststoffen in Wasser und Luft ist ebenfalls eine Lehre aus der geologischen Betrachtung. Dies ist jedoch nur ein akademischer Ansatz, da in vielen Ventilatoren oder Schlammpumpen gerade die

Gemischförderung eine Aufgabenstellung ist, der sich die Technik stellen muss.

Eine Verschleiß minimierende Lösung lässt sich in allen Fällen finden: hohe Härte des technischen Materials, verschleißgerechte Konstruktion einschließlich des Selbstschutzes, Vermeidung von Strömungshindernissen und vor allem die Vermeidung von turbulenter Strömung sind die Lehren aus der geologischen Erosionsarbeit.

6. Zusammenfassung

Die Beschäftigung mit Abrasion und Verschleiß in technischen Prozessen, bei denen mineralische Werkstoffe wie Sand, Steine, Erze oder Kohle mit metallischen Bauteilen in „Berührung“ kommen, führt zwangsläufig zur Betrachtung von mikroskopischen und makroskopischen Oberflächen-veränderungen. Die phänomenologische Betrachtung dieser metallischen Oberflächen lässt Vergleiche mit der natürlichen Erosion von Gestein und Gesteinsformationen durch Wasser, Wind und Sand zu. Eine Erosion von Bergen und Landschaften hat erstaunliche Ähnlichkeit mit den verschlissenen Oberflächen in Maschinen der mechanischen Verfahrenstechnik. Die Zeitachsen und die Dimensionen sind allerdings grundsätzlich verschieden: Die Natur lässt sich Tausende, ja sogar Millionen von Jahren Zeit, große Flächen zu verändern, wohingegen in energiereichen, technischen Prozessen schon in Stunden mikroskopische Veränderungen derselben Art zu verzeichnen sind.

7. Literatur

[1] H. Uetz; Abrasion und Erosion, Carl Hanser Verlag, München, Wien (1986)

[2] D. Dowson; History of Tribology, Longman Inc., New York (1979)

[3] G. Wagner; Einführung in die Geologie, Badenia-Verlag (1962)

[4] N. Grünert; Namibias faszinierende Geologie, Klaus Hess Verlag (2007)

[5] G. Schneider; The Roadside Geology of Namibia, Gebrüder Bornträger, Stuttgart (2007)

[6] H. Riegger; Die Verschleißverbundplatte – das Halbzeug zum großflächigen Einsatz gegen Abrasion, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, DGM, Bayreuth (2009)

[7] F. Press, R. Siever; Allgemeine Geologie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford (1995)

[8] H. Bahlburg, C. Breitkreuz; Grundlagen der Geologie, Elsevier, Heidelberg (2004)

[9] H, Czichos; Tribology, Elsevier Scientific Publishing Comp., Amsterdam (1978)

[10] G. Eisbacher, J. Kley; Grundlagen der Umwelt und Rohstoffgeologie, Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York (2001)

8. Bilder

Bild 1 Verschlissenes Laufrad einer Axialpumpe mit Auswaschungen und kapitalem Durchbruch aufgrund von Wasser – Feststoff – Förderung

Bild 2 Der Sesriem Canyon in der Namib Wüste entstand durch Erosionsarbeit des periodisch fließenden Wassers

Bild 3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Verschleißoberfläche aus hexagonalen Chromkarbidnadeln und ausgewaschener austenitischer Matrix

Bild 4 Konglomerat aus gerundetem Kiesel und weichem Sandstein, Sedimentgestein

Bild 5 Verschleißbelastete Oberfläche eines homogenen metallischen Werkstoffes, martensitischer Feinkornbaustahl

Bild 6 Verschleißbelastete Oberfläche eines heterogenen metallischen Werkstoffes: das härtere Karbid bleibt zunächst erhaben

Bild 7 Wind – Sand - erodierte Oberfläche im Sandstein von Twyfelfontein, Namibia

Bild 8 REM – Aufnahme einer verschleißbelasteten Oberfläche mit Vertiefung durch Wind – Feststoff – Erosion

Bild 9 Klassische Sandrippel durch Wind

Bild 10 Makroskopische Aufnahme einer Wind – Kohle – belasteten Oberfläche

Bild 11 Strahlverschleiß bis zum katastrophalen Versagen mit umgebender Dünenstruktur

Bild 12 Rippelbildung an einem Abstreifer durch Wasser – Beton – Gemisch

Bild 13 Rippelbildung am Sandstrand durch oszillierende Wasser – Sand – Strömung

Bild 14 Auslauf eines geschlossenen Radialpumpenlaufrades, verschlissen durch ein Wasser – Feststoff – Gemisch

Bild 15 Erosionsverschleiß an einem Sandstein durch fallendes Wasser – Sand – Gemisch

Bild 16 Oberfläche eines Findlings aus der Eiszeit, heterogenes Gefüge

Bild 17 Oberfläche einer künstlich bearbeiteten Bodenplatte, heterogenes Gefüge