

B. Denkena, B. Konopatzki, F. Seiffert, R. Knobel

Einsatz hochharter Schneidstoffe beim Schleifen

Trennschleifen von Natur- und Kunststein

■ Hochharte Schneidstoffe haben sich für das Werkstofftrennen und die Oberflächenbearbeitung aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit durchgesetzt. Als Abrasiv beim Schleifen spielen vor allem synthetischer Diamant und kubisches Bornitrid (CBN) eine zentrale Rolle. Die Erforschung der Potentiale dieser Schneidstoffe bei der Bearbeitung sprödharter und duktiler Materialien ist Inhalt zahlreicher Forschungsvorhaben. Im Rahmen einer Serie von vier Beiträgen zum Einsatz hochharter Schneidstoffe werden verschiedene Themen beleuchtet, die Schwerpunkte der Arbeitsgruppe Schleiftechnologie am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) bilden. Dieser erste Beitrag bietet einen Überblick zum Einsatz von Schneidstoffen beim Trennschleifen von Natur- und Kunststeinen und zeigt Potenziale zur weiteren Verbesserung der Prozesse auf.

Entwicklungsziele beim Trennschleifen

Ob als Prozessschritt zur Herstellung von Natursteinplatten aus Rohblöcken oder als Verfahren zum Einbringen von Fugen in Kunststein (Beton) – der Trennschleifprozess an Gesteinen nimmt eine zentrale Rolle bei der Verarbeitung dieser Werkstoffe ein. Dabei ist die Erhöhung der Effektivität des Trennprozesses ein aus ökonomischer und ökologischer Sicht stets verfolgtes Entwicklungsziel. Strebt eine Ökonomisierung einen wirtschaftlicheren Werkzeugeinsatz (Standzeiterhöhung) oder eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit (Zeitspanvolumina) an, so bezieht der Aspekt Ökologie den Werkstoff mit ein. Die Reduzierung des Verschnitts bei der Bearbeitung ist im Natursteinsektor ein vielfach verfolgtes Ziel. Bei der Bearbeitung geometrisch komplexer Bauwerke aus Baustoffen steht hingegen eine hohe Prozesssicherheit im Vordergrund.

Den weiter ansteigenden Bedarf an harten Schneidstoffen zeigt exemplarisch die prognostizierte Entwicklung des weltweiten Natursteinabbaus, untergliedert in Abraum und Nettoproduktion (Bild 1). Hierbei kann eine direkte Verknüpfung zwischen

Produktionsvolumen des Werkstoffes und der benötigten Menge an Bearbeitungswerkzeugen abgeleitet werden. Trotz konjunktureller Rückgänge wird mit einem im Mittel überproportionalen Zuwachs gerechnet.

Während ein hoher Anteil des ausgebrachten Gesteins bereits durch Beschädigungen bei der Gewinnung im Steinbruch und dem Weitertransport unbrauchbar wird, liegt der Bearbeitungsabfall durch das Trennschleifen und nachfolgende Prozesse bei einem Fünftel. Verbesserte Bearbeitungsprozesse können einen großen Beitrag zur effizienteren Werkstoffausnutzung und einer Erhöhung der Gesamtproduktivität leisten.

Trennschleifverfahren

Zum Trennen von Gesteinen kommen unterschiedliche Schleifverfahren zum Einsatz, die jeweils charakteristische Vor- und Nachteile aufweisen. Im Bereich der Natursteinbearbeitung wurde zum Auftrennen von Rohblöcken traditionell die Gattersäge verwendet. Zeichnet sich das Gatter durch eine geringe Schnittbreite und hohe Prozesssicherheit aus, so hat die geringe Produktivität, messbar anhand der Zeitspanfläche Q'_{wv} , zu einer Substitution des Gatters durch



Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover



Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benjamin Konopatzki
wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFW



Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Florian Seiffert
wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFW



Dipl. Geow. Robert Knobel
wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFW

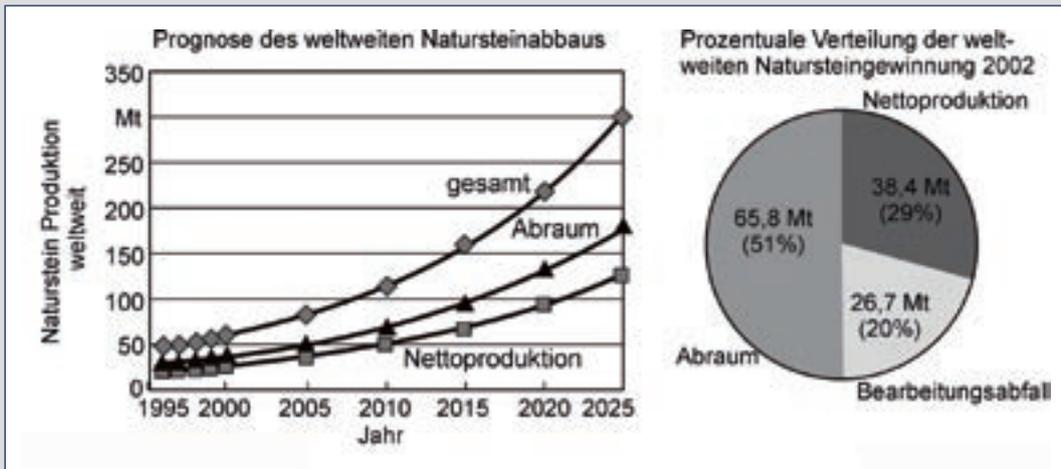


Bild 1
Prognostizierte weltweite Natursteingewinnung

andere Verfahren geführt. Der Einsatz synthetisch hergestellter Diamanten in den siebziger Jahren führte zur Etablierung von Multiblatt-Kreissägen. Hierdurch wurden erhebliche Produktivitätszuwächse möglich, die durch die Weiterentwicklung von Multiseissägen in den neunziger Jahren noch gesteigert wurden^[1]. Bild 2 zeigt einen Verfahrensvergleich für die Bearbeitung von Granit mit ausgewählten Kennwerten für Granit der Bearbeitungsklasse 3.

Die größeren Schnittabweichungen der freilaufenden Seile und die teilweise eingeschränkte Prozesssicherheit stehen einem

flächendeckenden Einsatz des Seilsägens bislang noch entgegen. Das System Kreissäge bietet daher den bislang besten Kompromiss aus den zu Grunde gelegten Kennwerten.

Im Bereich der Kunststein- oder auch Baustoffbearbeitung ist der vorherrschende Werkstoff Beton bzw. mit Stahl armierter Beton. Neben der Kreissäge hat sich auch hier die Seilsäge als sehr flexibles Bearbeitungsverfahren etabliert. Modulare Systeme benötigen lediglich eine Person zum Betrieb und sind an unterschiedlichste Schneidaufgaben im Baubereich anpassbar^[2]. Dennoch kann ein Sicherheitsrisi-

ko für den Bediener durch plötzliche Seilrisse nicht ausgeschlossen werden. Für das Einbringen kleinerer zylindrischer Durchbrüche ist darüber hinaus das Trennschleifen mit Kernloch-Bohrkronen das gegenwärtig meistverbreitete Verfahren. Bei größeren Durchmessern wird auch die zirkular verfahrenende Seilsäge verwendet.

Werkzeugsystem zum Trennschleifen

Schleifwerkzeuge für die Gesteinsbearbeitung bestehen überwiegend aus hochharten Schneidstoffen, die stochastisch verteilt in einer Bindungsmat-

Gattersägen	Kreissägen	Seilsägen
Schnittbreite 6 - 8 mm	7 - 7,5 mm	7 - 9 mm
Schnitttiefe > 2 m	300 mm	> 2 m
Schnittabw.: +/- 1 mm	+/- 0,5 mm	+/- 1,5 mm
$Q'_w = 40 - 80 \text{ cm}^2/\text{min}$	$Q'_w = 400 - 450 \text{ cm}^2/\text{min}$	$Q'_w = 500 - 600 \text{ cm}^2/\text{min}$
Schleifstoff: Stahlschrot	Diamant	Diamant

Bild 2
Verfahrensvergleich von Trennschleifverfahren für die Natursteinbearbeitung

rix zu Segmenten beinahe beliebiger Geometrie gesintert werden.

Der hochharte Schneidstoff Diamant hat sich bei Trennschleifprozessen an Gesteinen gegenüber Stahlschrot, Korund, Quarzsand und Siliziumkarbid aufgrund seines deutlich besseren Einsatzverhaltens durchgesetzt und eröffnet große Potenziale in schleiftechnologischer Hinsicht^[3-6]. Diese ergeben sich neben seiner hohen Härte vor allem durch die große Wärmeleitfähigkeit, hohe Druck- und Zugfestigkeit sowie den niedrigen Reibungskoeffizienten^[7-10]. Der synthetisierte Diamant findet dabei überwiegend Verwendung^[11]. Im Gegensatz zum Naturdiamant weist er weniger Gitterbaufehler auf und ist dadurch mechanisch beständiger. Zudem lassen sich die Eigenschaften durch die Prozessführung bei der Herstellung auf die Erfordernisse der Schleifaufgabe anpassen.

Aufgrund der geringen Schlagfestigkeit des Diamanten ist zur Ausnutzung der Eigenschaften die Einbindung in eine dämpfende Bindematrix notwendig. Kobalt wurde aufgrund seiner Härte und der geringen Reibungs-

koeffizienten lange bevorzugt als Bindungsmaterial eingesetzt. In Verbindung mit Anteilen weiterer Legierungselemente zeichnen sich diese Bindungen durch hohe Kornhaltekräfte und einen großen Diamantkornüberstand aus. Die karzinogenen Eigenschaften von Kobalt führten zu Entwicklungen alternativer Werkstoffe auf Basis von Eisenpulvern mit vergleichbarem Einsatzverhalten^[12].

Auslegung des Werkzeugsystems

Prinzipiell werden zwei Auslegungsarten für Werkzeugbindungen in Abhängigkeit des Werkstoffes unterschieden. Für härteres Gestein wie Granit oder Beton mit hohem Anteil an Flintstein wird eine weiche Bindung eingesetzt, für einen weichen Werkstoff wie Marmor hingegen eine harte. Bei der Bearbeitung harter Werkstoffe werden die schneidenden Diamantkörner schnell angeflacht und herausgebrochen. Daher ist eine Zurücksetzung der Matrix notwendig, um tiefer liegende Diamanten freizulegen und in Eingriff zu bringen. Somit wird durch eine weiche Bindung ein Herausbrechen der angeflachten Diaman-

ten gewährleistet und die nicht-aktiven Diamanten zum Einsatz gebracht, woraus eine Reduzierung der Reibkräfte resultiert. Bei der Bearbeitung weicherer Werkstoffe wie Marmor ist die Diamantbelastung hingegen geringer, so dass sie langsamer anflachen. Die Verwendung einer harten Matrix gewährleistet hier einen längeren Einsatz der noch schneidfähigen Körner. Um ein optimales Bearbeitungsergebnis erzielen zu können, müssen daher die Prozessgrößen aufeinander abgestimmt sein^[13]. Bild 3 oben stellt schematisch die Verschleißmechanismen von auf Weich- und Hartgestein ausgelegten Segmenten dar.

Als Körnung wird überwiegend blockiger, splitterfreudiger Diamant mit Durchmessern von $d=150$ bis $900\mu\text{m}$ verwendet. Größe und Splitterneigung variieren, wie das Bindungsmaterial, je nach Werkstoff und Hersteller. Tendenziell werden für Hartgesteine jedoch kleinere Diamantkörnungen aufgrund deren höherer Bruchfestigkeit verwendet. Für die Diamantkonzentration werden je nach Anwendungsfall und Hersteller Werte bis C50 angegeben, dies entspricht 2,2Kt bzw. 0,44g Diamantkorn pro

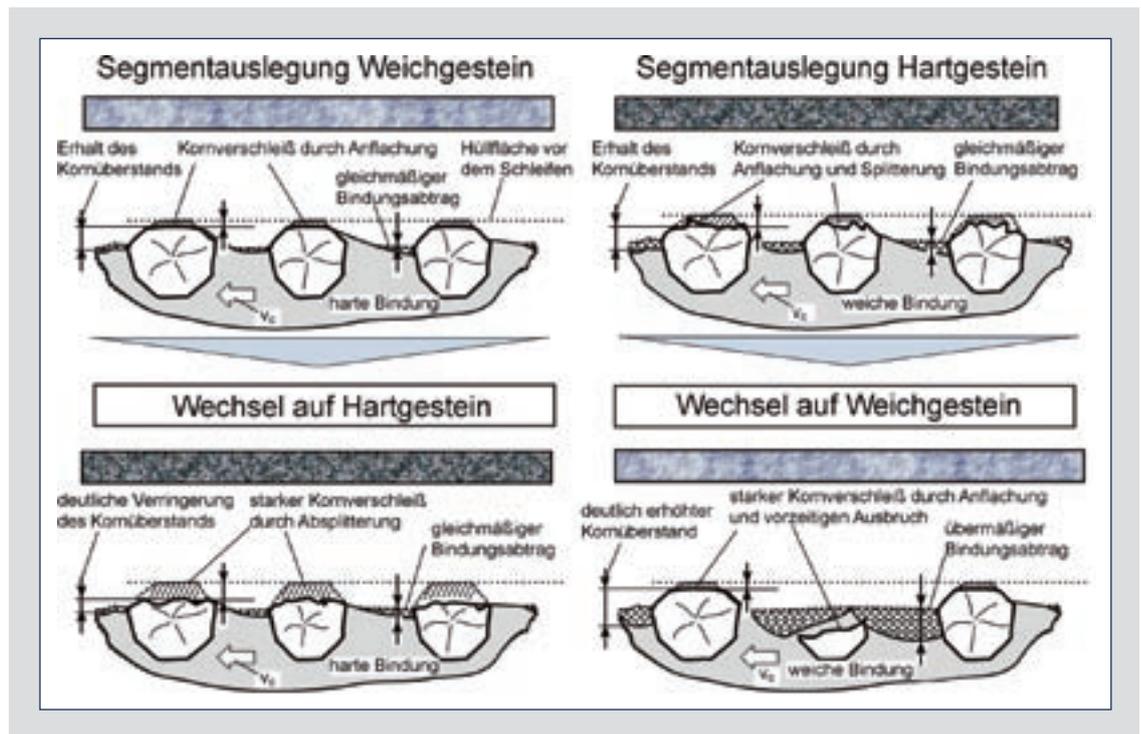


Bild 3
Auslegung der Segmente und Probleme beim Werkstoffwechsel

Seit über 40 Jahren immer an der Spitze

Kubikzentimeter Schleifbelag^[14]. Verschiedene Ansätze zielen auf die Ermittlung einer idealen Konzentration, bei der die Diamantkörner ein günstiges Einsatzverhalten zeigen. Ein Großteil der Körnung bleibt durch die stochastische Verteilung der Diamanten und die Überdeckungen der Wirkbahnen jedoch weiterhin ungenutzt.

In den letzten Jahren sind Werkzeuge mit geometrisch definiert gesetzten Körnern auf den Markt gekommen. Das Potenzial wurde im Bereich Gestein aber wissenschaftlich bislang noch nicht belegt. Für die Werkzeugauslegung des Kreis- als auch des Seilsägens wurden jedoch bereits Modelle zur Auslegung der Segmenttopographie und der Diamantkonzentration auf Grundlage von Ritzuntersuchungen entwickelt^[15]. Untersuchungen an realen Versuchsmustern müssen das Potenzial dieser Modellvorstellungen belegen und sind Gegenstand aktueller Arbeiten am IFW.

Prozessverhalten

Während bei den meisten bekannten Schleifprozessen die Leistungsfähigkeit und die erreichbare Bearbeitungsqualität eng mit deren Abrichtprozessen verknüpft sind, wird beim Trennschleifen von Gestein nahezu vollständig auf eine Einsatzvorbereitung verzichtet. Die Prozesse sind weitestgehend als Selbstschärfprozesse ausgelegt, so dass sich die Schleifbelagstopographie vollständig in Abhängigkeit von den Schleif- und Werkstoffeigenschaften sowie den eingestellten Prozessparametern ausbildet. Nur bei einem anforderungsgerecht ausgelegten Prozess und einer längeren Einschleifphase stellt sich ein stationäres Bearbeitungsverhalten ein. Dabei kommt es zu einem wechselseitigen Verschleiß von Diamant und Bindungsmaterial, wodurch immer neue Schneidstoffschichten freigelegt werden^[3]. Durch nicht

an den Werkstoff angepasste Werkzeug- und Prozessparameter kommt es beim Trennschleifen von Naturstein und Beton häufig zu erhöhtem Werkzeugverschleiß, bis hin zu totalem Versagen und zu deutlich höheren Bearbeitungszeiten. Eine Ursache ist bei der Baustoffbearbeitung unter anderem darin zu finden, dass die genaue Zusammensetzung des zu bearbeitenden Werkstoffs oft nicht bekannt ist^[16]. Durch unterschiedliche Zuschlagstoffe variieren die Spezifikationen des Betons und damit die Bearbeitbarkeit erheblich. Selbst nominell gleiche Zuschläge können je nach Herkunftsort deutlich unterschiedliche Trennmechanismen und damit Bearbeitungseigenschaften aufweisen, die eine Prozessauslegung erschweren^[17,18]. Insbesondere der Einsatz von Diamant als Schneidstoff erfordert jedoch eine angepasste Einstellung der Bearbeitungsparameter^[19-22]. Ein Verfahren zur Prozessauslegung in Abhängigkeit der Bearbeitungseigenschaften wird derzeit am IFW erforscht. Dazu soll von den Schallsignalen auf das Materialtrennverhalten zurückgeschlossen und Parameter für eine wirtschaftliche und prozesssichere Bearbeitung identifiziert werden^[23].

System Trennschleifscheibe

Bei der Herstellung von Natursteinplatten und dem Einbringen von Fugen und Durchbrüchen kommen heute überwiegend Trennschleifscheiben zum Einsatz. Diese bestehen aus einem genuteten metallischen Stammblatt, auf das die gesinterten Schleifsegmente aufgelötet oder mittels Laser aufgeschweißt werden. Bei der Natursteinbearbeitung ist das Volumen an zerspantem Werkstoff durch breite Schleifscheiben aus ökologischer und ökonomischer Sicht ungünstig. Die Zerspanungsraten (zerspantes Volumen/Rohblockvolumen) betragen bis zu 60%. Bislang wurde der Einsatz

Der Diamant ist das härteste bekannte Material. Generationenübergreifendes Arbeiten mit diesem Kristall und ebenso harter Arbeit an uns selbst haben die Mössner GmbH in Innovationskraft, Zuverlässigkeit und Serviceorientierung zu einem Juwel der Branche geschliffen. Gerne entwickeln wir für Sie individuelle Lösungen für Ihre Aufgabenstellung. Fordern Sie uns!



Wir stellen aus:
EURMOLD
Halle 9.0 / Stand E31



MÖSSNER
IDEEN AUS DIAMANT

Mössner GmbH • Diamantwerkzeugfabrik
Kelterstraße 82 • 75179 Pforzheim
Tel. 07231/440558 • www.hamoedia.de

extrem dünner Schleifscheiben durch die mangelnde Steifigkeit der Schleifblätter während des Trennprozesses verhindert. Die auftretenden Prozesskräfte führten zu Verformungen des Stammblattes und infolgedessen zu Schnittverlauf. Der höhere Arbeitsaufwand in den nachfolgenden Bearbeitungsschritten überwog die Vorteile der dünnen Trennfugen. Im Rahmen des EU-Projekts I-STONE gelang es, am Beispiel der Granitbearbeitung, durch den Einsatz von konischen Stammblättern (Blattdicken von 3 bis 3,3 mm) und Sandwichsegmenten bei hohen Schnittgeschwindigkeiten (bis 60 m/s), Platten von ausreichender Qualität herzustellen. Durch die hohe Schnittgeschwindigkeit konnte die dynamische Steifigkeit der Schleifblätter erhöht werden, der Einsatz von Sandwichsegmenten bewirkt eine bessere Führung in der Trennfuge. Für die bei diesen Schnittgeschwindigkeiten auftretenden erhöhten mechanischen Belastungen wurden gesinterte Bindungen mit reduziertem Kobaltgehalt verwendet, durch die höhere Kornhaltekräfte und ein erhöhter Verschleißwiderstand erzielt wurden. Außerdem konnte der Verschleiß durch eine Zufuhr des Kühlwassers mit der Schnittgeschwindigkeit reduziert werden. In den durchgeführten Untersuchungen wurde bei Zustellung von $a_e = 4 \text{ mm}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_{ft} = 13 \text{ m/min}$ eine Zeitspanfläche von $Q'_w = 520 \text{ cm}^2/\text{min}$ erreicht, welche die konventionelle Schnittrate für diese Granitart ($400 \text{ cm}^2/\text{min}$) um 30 % über-

trifft. Gleichzeitig konnten die Prozesskräfte gegenüber einem konventionellen Prozess mit einem Standardwerkzeug deutlich gesenkt werden. Das zerspannte Volumen konnte um ca. 40 % reduziert werden, wodurch natürliche Ressourcen geschont und Entsorgungskosten verringert werden können. Die Kosten für die Werkzeuge wurden darüber hinaus reduziert, da weniger Diamanten und Bindungspulver benötigt werden. Das verwendete vorlegierte Bindungspulver ist zudem ca. 30 % günstiger als herkömmliche Kobaltpulver. Durch die höhere Zeitspanfläche und folglich geringeren Bearbeitungszeiten können Lohn- und Maschinenkosten gespart werden. Die konischen Stammblätter sind im Vergleich zu herkömmlichen Blättern allerdings noch um ca. 25 % teurer^[24]. Die Analyse der Ursachen von nicht maßhaltigen Schnitten durch ein seitliches Verlaufen der Trennschleifscheibe deutet auf die Notwendigkeit einer Betrachtung des gesamten Systems Werkzeugmaschine hin. Neben der Fertigungsqualität der Werkzeuge selbst haben das Flanshsystem, das Anzugsmoment und Schwingungen der Maschinenstruktur großen Einfluss auf die Schnittqualität^[25].

Seilschleifen

Das Seilschleifen nimmt eine Sonderstellung innerhalb der Trennverfahren ein, die auf dem Einsatz hochharter Schneidstoffe beruhen und vornehmlich für die Bearbeitung von Natur- und

Kunststein eingesetzt werden. Es unterscheidet sich grundlegend vom Trennschleifen mit kreisförmigen Schleifscheiben durch die geometrische Gestalt, das kraftgebundene Prinzip der Vorschub-erzeugung und seine Einsatzflexibilität.

Grundelement dieses Werkzeugs ist das Trägerseil, auf dem die zylindrischen Schleifsegmente in definierten Abständen aufgereiht werden. Diese so genannten Schneidperlen bestehen aus einem metallischen Grundkörper, auf dessen Oberfläche die Diamanten in einer metallischen Bindung gebunden sind. Grundsätzlich lassen sich gesinterte, galvanisch belegte und (aktiv) gelötete Schneidperlen unterscheiden^[26]. Die im Natursteinbereich größte Verbreitung haben gesinterte, mehrschichtige Seilschleifwerkzeuge. Im Baubereich mit hohem Metallanteil im Stahlbeton werden einschichtige, galvanisch belegte oder aktiv gelötete Perlen verwendet.

In der jüngeren Vergangenheit ist das Seilschleifen aufgrund seiner Einsatzflexibilität verstärkt auch zum Trennen von metallischen Strukturen zum Einsatz gekommen. Basis dieser Flexibilität ist bei praktisch unbegrenzter Länge des Werkzeuges die uneingeschränkte Schnitttiefe sowie die Form des zu trennenden Werkstückes. Anwendungen finden sich beispielsweise beim Rückbau kerntechnischer Anlagen und bei der Bearbeitung von Offshore-Anlagen wie Pipe-

Leserbriefe an die Redaktion
biermann@harnisch.com

lines oder gesunkenen Schiffen. Besondere Herausforderungen ergeben sich in diesem Anwendungsgebiet durch die hohe Verschleißwirkung der Materialpaarung Diamant und Stahl sowie durch den geringen Selbstschärfeffekt beim Einsatz von gesinterten, mehrschichtigen Werkzeugen. Ziel weiterer Arbeiten ist es, den Schneidstoff Diamant sowie das metallische Bindungsmaterial durch neue Stoffe zu substituieren. Hierdurch soll die Eignung des Seilschleifverfahrens mit mehrschichtigen Werkzeugen für die Stahlbearbeitung verbessert werden.

Zusammenfassung

Die Trennschleifbearbeitung von Naturstein und Bauwerkstoffen wie Beton wird heute überwiegend mit diamantbesetzten Werkzeugen durchgeführt. Besonders im Natursteinsektor wird die Menge an zu verarbeitendem Werkstoff und damit auch an benötigten Diamantwerkzeugen mittelfristig weiter steigen. Bei der stetigen Weiterentwicklungen der Trennverfahren, und hier besonders der Multiseilsäge, bewirken insbesondere leistungsfähigere Werkzeugsysteme eine Produktivitäts-

steigerung der Bearbeitungsprozesse. Definierte Körnungssetzungen könnten unter der Voraussetzung wirtschaftlicher Fertigungsmethoden der Werkzeuge eine Möglichkeit zur besseren Ausnutzung der Schneidstoffe bieten. Potenziale bestehen weiterhin hinsichtlich einer effektiveren Anpassung der Prozessgrößen an die Schneidaufgabe und damit eine größere Prozesssicherheit. Voraussetzung hierfür sind jedoch Methoden, die dem Bediener die Auswahl effizienter Werkzeuge und Stellgrößen abhängig von den Werkstoffeigenschaften erlauben. ■

Bildnachweis Bild 1 OSNET Editions Vol. 13; Bild 2 und 3 IFW

Literaturnachweis [1] Glatzel, T.: Trennschleifen von Granit mit dünnen Werkzeugen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2004 [2] Denkena, B.; Bockhorst, J.; Brehmeier, S.; Apmann, H.; Glatzel, T.; Lünemann, M.: Kompakte Seilsäge für die Bearbeitung von Baumaterialien. *Industrie Diamanten Rundschau*, 39 (2005) 3, S. 228–238 [3] Ertingshausen, W.: Zerspanung von Granit mit Diamant-Trennschleifscheiben. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1985 [4] Autorenkollektiv: Sägen von Gestein – Stand und Entwicklung. Callwey Verlag München, 1975 [5] Autorenkollektiv: Steinkolloquium 1978 – Fortschritte in der Steinbearbeitung. Begleitband zum 2. IFW-Steinkolloquium, Hannover, 1978 [6] Autorenkollektiv: Steinkolloquium 1981 – Entwicklungen in der Steinbearbeitung. Begleitband zum 3. IFW-Steinkolloquium, Hannover, 1981 [7] Burls, J.: *Science and Technology of Industrial Diamonds – Volume One: Science*. Industrial Diamond Information Bureau, London, 1967 [8] Burls, J.: *Science and Technology of Industrial Diamonds – Volume Two: Technology*. Industrial Diamond Information Bureau, London, 1967 [9] n.n.: *Die Eigenschaften des Diamanten*. De Beers Industrial Diamond Division (Firmenpublikation), Charters, 1989 [10] Tillmann, W.; Klaassen, M.: *Diamant-Verbundwerkstoffe zur trockenen Gesteinsbearbeitung*. *Industrie Diamanten Rundschau*, 38 (2004) 3, S. 365–371 [11] Engels, A.: *The role of particles per carat in diamond tool behaviour*. *Industrial Diamond Review*, 63, (2003) 2, S. 39–42 [12] Denkena, B.; Reichstein, M.; Bockhorst, J.; Glatzel, T.: *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Granit mit dünnen Trennschleifscheiben*. *Industrie Diamanten Rundschau*, 40 (2006) 3, S. 36–49 [13] Asche, J.: *Tiefschleifen von Granit*. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2000 [14] Bienert, P.: *Kreissägen von Beton mit Diamantwerkzeugen*. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1978 [15] Denkena, B.; Bockhorst, B.; Seiffert, F.: *Auslegung von Schneidkörpern für das Seilschleifen*. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Band 104 (2009) Heft 5, S. 340–347 [16] Georgiadis, A.; Sergeev, E.: *Messdatenerfassung und Prozessoptimierung beim Hochgeschwindigkeitsfräsen von Marmor, Granit und technischer Keramik mit DIAdem*, *Virtuelle Instrumente in der Praxis*, Konferenz-Einzelbericht: *Praxiswissen Elektronik-Industrie: Messtechnik - Automatisierung*, 2003, S. 55–60 [17] Tillmann, W.: *Hartmetalle im Bauwesen - Anwendungen in Bohrwerkzeugen*, Konferenz-Einzelbericht: *Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis*, Band 13, Seite 265–281, MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1997 [18] Tillmann, W.: *Neue Produkte - Neue Märkte: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis*, Band 16, VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, 2000, S. 181–194 [19] Konstanty, J.: *Theoretical analysis of stone sawing with diamonds*, *Journal of Materials Processing Technology*, Band 123, Heft 1, 2002, S. 146–154 [20] Qi, H.S.; Rowe, W. B.; Mills, B.: *Contact length in grinding. Part 2: evaluation of contact length models*; *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J (Journal of Engineering Tribology)*, Band 211 (1997), Heft J1, S. 77–85 [21] Tönshoff, H. K.; Marzenell, C.: *Properties of Tooth Surfaces Due to Gear Honing With Electroplated Tools*. *Proceedings of the 4th World Congress on Gearing and Power Transmission*, Paris, 16.–18. März 1999, S. 1711–1724 [22] Tönshoff, H. K.; Marzenell, C.: *Comparison of Surfaces Generated by Different Finishing Processes for Gears*. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automotive Technology & Automation*, Wien, 14.–18. Juni 1999, Teilband „Advanced Manufacturing in the Automotive Industry“, S. 51–60 [23] Denkena, B.; Boehnke, D.; Konopatzi, B.; Buhl, J.-C.; Rahman, S.; Robben, L.: *Schallemissionsanalyse beim Trennschleifen von Beton*. *Industrie Diamanten Rundschau*, 42 (2008) 1, S. 52–58 [24] Denkena, B.; de Leon, L.; Bockhorst, J.: *Werkzeug- und Prozessauslegung für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Granit*. Begleitband zum Seminar „6. IFW-Steinkolloquium“, Hannover, 12./13.11.2008, S. 43–51 [25] Pelschenke, C.; Denkena, B.; Bockhorst, J.; Reithmeier, E.; Fahlbusch, T.; Rahlves, M.: *Schnittverlauf beim Trennschleifen von Naturstein*. *DIAMANT HOCHLEISTUNGSWERKZEUGE*, 1 (2009) 2, S. 26–35 [26] Apmann, H.: *Seilschleifen von Stahlbeton*. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2004