Untersuchung von mineralischen Baustoffen mit Bohrwiderstandsmessverfahren

Merkblatt E-3-21

Ausgabe: 10.2026/D
Einspruchsfrist: 30.04.2027

Investigation of mineral building materials using drilling resistance measurement techniques

Analyse des matériaux de construction minéraux à l'aide de la méthode de mesure de la résistance au forage

Deskriptoren

Bohrwiderstandsmessung, Bohrhärte, Baustoffe, Mauerwerk, Prüfverfahren, Überprüfung, Festigkeit, Tiefenprofil, Verwitterung, Konservierungsmaßnahmen, Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit

Key Words

Drilling resistance measurement, drilling hardness, building materials, masonry, test methods, inspection, strength, depth profile, weathering, preservation measures, effectiveness, durability

Mots-clés

Mesure de la résistance au forage, dureté au forage, matériaux de construction, maçonnerie, méthodes d'essai, contrôle, résistance, profil en profondeur, altération, mesures de conservation, efficacité, durabilité

Erläuterungen zum Merkblatt

Ergänzend sind folgende WTA-Merkblätter in der jeweils aktuellen Fassung heranzuziehen:

Freiexemplar

Inhalt

		Seite
1	Einleitung	4
2	Messverfahren und Messsysteme	4
2.1	Messprinzip A	5
2.2	Messprinzip B	8
3	Messergebnis und Auswerteverfahren	8
3.1	Bohrwiderstand als Materialkennwert	8
3.2	Bohrwiderstandsprofil	9
3.3	Auflösung	9
3.4	Bewertung von Messergebnissen von Materialien mit grobem Gefüge	9
3.5	Darstellung von Verwitterungsprofilen größerer Oberflächenbereiche	10
4	Störeinflüsse und Einsatzgrenzen	10
4.1	Zustand des Bohrers	10
4.2	Bohrmehl/Feuchtigkeit	10
4.3	Fehlerhafte Handhabung der Geräte	10
4.4	Vergleichbarkeit der Ergebnisse	11
4.5	Einsatzgrenzen	11
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	11
6	Literatur	12
7	Anhang	13

© Copyright by Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International e.V.
Vertrieb: WTA Publications, Tel. +49-89-57 86 97 27, Fax +49-89-57 86 97 29, email: info@wta-international.org

Fraunhofer IRB | Verlag

WTA ENTWURF

Untersuchung von mineralischen Baustoffen mit Bohrwiderstandsmessverfahren

Deutsche Fassung vom Oktober 2026

Referat 3 Naturstein und Kunststein

Leiter des Referates

Eberhard Wendler

Fachliche Leitung

Stephan Pfefferkorn

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Gerhard D'ham
Mathias Kocher
Rolf Krompholz †
Esther von Plehwe-Leisen
Ludwig Sattler
Robert Sobott
Eberhard Wendler

Erarbeitung des Merkblattes

Beginn der Arbeiten: September 2014
Ende der Arbeiten: April 2026
Merkblattentwurf: Oktober 2026
Endgültige Fassung: –

ISBN (E-Book) 978-3-7388-1102-5

Freiexemplar

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung geschlechterspezifischer Sprachformen verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

WTA-Merkblätter

Herausgeber

WTA International e.V., Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International e.V.

Schriftleitung

Clemens Hecht, Tobias Steiner

Vertrieb

WTA Publications
Telefon +49-89-57 86 97 27, Fax +49-89-57 86 97 29, email: info@wta-international.org

Die WTA ist stets bemüht in ihren Merkblättern den jeweiligen aktuellen Stand des Wissens festzuhalten. Wenn Sie vor Ablauf der Einspruchsfrist Verbesserungen, Änderungen vorschlagen möchten, wenden Sie sich bitte direkt an den Leiter der Arbeitsgruppe.

© Alle Rechte bei der WTA International e.V.. Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung gestattet.

Die Angaben in diesem Merkblatt stützen sich auf den derzeitigen Stand unserer Kenntnisse. Die WTA International e.V. kann jedoch keinerlei Haftung übernehmen. Vorschläge oder Einwände, die gegebenenfalls bei einer Neuauflage berücksichtigt werden können, sind an die Geschäftsstelle der WTA International e.V. zu richten.

Bei Streitfällen ist die deutsche Fassung gültig.

Den auftragvergebenden Architekten, Denkmalpflegeämtern und den staatlichen, kommunalen und kirchlichen Bauämtern wird nahegelegt, auf dieses und die weiteren Merkblätter der WTA zum Bautenschutz und zur Bauwerksinstandsetzung in Ausschreibungen und Aufträgen Bezug zu nehmen und deren Kenntnisnahme allen Auftragnehmern zur Auflage zu machen.

Fraunhofer IRB Verlag, 2026
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
Telefon +49 7 11 970-25 00, Telefax +49 7 11 970-25 99, E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de, http://www.baufachinformation.de

Kurzfassung

Mit Bohrwiderstandsmessungen lassen sich Festigkeitseigenschaften von mineralischen Objekten im oberflächennahen Tiefenprofil erfassen und beurteilen. Das Prüfverfahren wird im vorliegenden Merkblatt in seiner Funktionsweise, Anwendung, Auswertung und Interpretation beschrieben. Die zerstörungsarme Prüfmethode reduziert die Notwendigkeit größerer Eingriffe für die Zustandserfassung am Bauwerk erheblich. Das Verfahren ist geeignet, Festigkeitseigenschaften, Zustand, Fortschritt von Verwitterungsprozessen oder Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Konservierungsmaßnahmen zu ermitteln.

Deskriptoren: Bohrwiderstandsmessung, Bohrhärte, Baustoffe, Mauerwerk, Prüfverfahren, Überprüfung, Festigkeit, Tiefenprofil, Verwitterung, Konservierungsmaßnahmen, Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit

Abstract

Surface-near depth profiles of the strength properties on mineral objects can be obtained by measurements of the drill resistance. The present leaflet describes functionality, application, evaluation and interpretation of the method. The minimally invasive test reduces the necessity of larger impacts for damage diagnosis on buildings. The method is useful to observe strength properties, the state of preservation, the course of a weathering process as well as the efficiency and durability of conservation measures.

Key Words: Drilling resistance measurement, drilling hardness, building materials, masonry, test methods, inspection, strength, depth profile, weathering, preservation measures, effectiveness, durability

Résumé

La résistance au perçage est une technique qui permet de déterminer le profil de profondeur de la résistance mécanique des objets minéraux. La présente recommandation décrit modes de fonctionnement, les possibles applications de cette technique ainsi qu'une méthode d'évaluation et d'interprétation des résultats obtenus. La résistance au perçage est une technique minimalement invasive, qui est appropriée pour estimer la propriété de résistance, l'état de conservation des matériaux testés, son développement de dégradation ainsi que pour évaluer l'efficacité et la durabilité de traitements de conservation. Cette méthode permet ainsi d'éviter d'autres tests plus invasifs.

Mots-clés: Mesure de la résistance au forage, dureté au forage, matériaux de construction, maçonnerie, méthodes d'essai, contrôle, résistance, profil en profondeur, altération, mesures de conservation, efficacité, durabilité

FreiExemplar

1 Einleitung

Die Erarbeitung von Instandsetzungs- und Konservierungskonzepten zur Erhaltung von mineralischen Bauwerks- und Skulpturoberflächen erfordert detaillierte Kenntnisse zum Material und zum konkreten Schadenszustand. Speziell bei Oberflächen aus Naturstein, aber auch bei Ziegel/Keramik und Kunststein sowie bei Stuck- und Putzoberflächen sollen Verwitterungsschäden detektiert und der Schädigungsgrad eingeschätzt werden.

Darüber hinaus sollte der erzielte Effekt ausgeführter Konservierungsmaßnahmen im Sinne einer Kontrolle von Wirksamkeit und Nachhaltigkeit verifizierbar sein.

Verwitterungs- bzw. maßnahmebedingte Materialveränderungen – die sich in erster Linie als Änderung von Festigkeitseigenschaften im oberflächennahen Bereich abzeichnen – vollziehen sich von der unmittelbaren Oberfläche bis in Tiefen von mehreren Millimetern und Zentimetern.

Für die Ermittlung solcher Eigenschaftsprofile hat sich das Bohrwiderstandsmessverfahren etabliert[1]. Daneben existieren andere zerstörungsfreie Verfahren, die aber entweder nicht die gewünschte Auflösung liefern (Georadar, Ultraschall) oder zerstörende Probenentnahmen in oftmals unzulässigem Umfang und Abmessungen erfordern (Ultraschalluntersuchung oder Bestimmung der biaxialen Biegezugfestigkeit am Bohrkern).

Dieses Merkblatt hat das Ziel, die bestehenden Konzepte der Bohrwiderstandsmessung und die derzeit im Einsatz befindlichen Gerätetypen sowie deren Einsatzgrenzen zu beschreiben. Ferner werden Möglichkeiten zur Auswertung der Daten und die daraus ableitbaren Aussagen erläutert.

Mit den in diesem Merkblatt behandelten Bohrwiderstandsmessverfahren sind explizit nur Verfahren zur Bestimmung von Eigenschaftsprofilen an mineralischen Materialien gemeint. Nicht Gegenstand des Merkblatts sind Verfahren zur Untersuchung von Holzquerschnitten (z. B. Resistograph).

Freiexemplar

2 Messverfahren und Messsysteme

Bei derzeitigen Bohrwiderstandsmessverfahren werden Bohrungen mit kleinem Durchmesser und konstanter Drehzahl in dem zu untersuchenden Objekt vorgenommen. Dabei wird der Widerstand des jeweiligen mineralischen Materials gegen das Eindringen eines rotierenden (und ggf. schlagenden) Bohrers als Funktion der Bohrtiefe erfasst.

Es existieren unterschiedliche Gerätetypen, die sich hinsichtlich Messprinzip und technischem Aufbau erheblich unterscheiden, jedoch Baugruppen vergleichbarer Funktion aufweisen:

- Den Antrieb des Bohrers übernehmen handelsübliche Bohrmaschinen.
- Diese Antriebsmaschinen sind über Gleitschienen oder Linearführungen und einen Schlitten mit einem Gehäuse verbunden, das mittels Abstandshalter senkrecht zur Objektoberfläche ausgerichtet werden muss.
- Eine analoge oder digitale Einheit zeichnet den Eindringprozess des Bohrers während der Messung auf.
- Der Vortrieb der Bohreinheit in das zu untersuchende Material wird entweder mittels angehängter Gewichte, über Schrittmotoren oder pneumatisch realisiert.

Zwei unterschiedliche Messprinzipien sind zu unterscheiden (vgl. Bild 1):

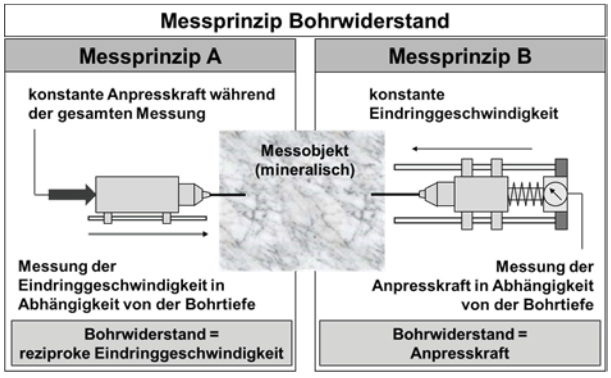


Bild 1 Schematische Darstellung der zwei Messprinzipien zur Bestimmung von Bohrwiderstandsprofilen

1 Weitere Bezeichnungen: Bohrhärte, Mikrobohrhärte

Die ermittelte tiefenabhängige Messgröße ist entweder

- die variable Bohrdauer bei konstanter Andruckkraft (Messprinzip A) oder
- die variable Andruckkraft bei konstanter Eindringgeschwindigkeit des Bohrers (Messprinzip B)

Es sind Messungen an Bauwerks- und Skulpturenoberflächen aus mineralischen Materialien im Innenraum und im Freien sowie an Probekörpern im Labor möglich. Für Messungen am Objekt werden die Messgeräte auf einem Stativ montiert. Unter Umständen sind freihändige Messungen möglich.

Als Ergebnis erhält man den Bohrwiderstand als Funktion der Bohrtiefe.

Wahl objektadäquater Geräteeinstellungen

Bei den Messungen müssen die Leistungsmerkmale des Bohrwiderstandsmessgerätes durch Wahl geeigneter Geräteeinstellungen auf die Festigkeitseigenschaften des zu untersuchenden Materials abgestimmt werden. Dies betrifft z. B. die Auswahl der Rotationsgeschwindigkeit, des Anpressdruckes bzw. der Vortriebsgeschwindigkeit und des Bohrers. Die unmittelbare Vergleichbarkeit von Messergebnissen, die mit unterschiedlichen Einstellungen am Messsystem vorgenommen worden sind, ist nur bedingt gegeben.

Bohrerarten und Bohrergeometrien

Es können Bohrer mit Hartmetalleinsatz (Widia-Bohrer) und Bohrer mit einem künstlichen Diamanteinsatz (PKD: Poly-Kristalliner Diamant) verwendet werden. PKD-Bohrer weisen eine wesentlich größere Härte und Verschleißfestigkeit, jedoch höhere Sprödigkeit auf. Die Ausformung der Bohrerschäfte, d. h. Länge, Steigung und Volumen der Spiralgänge, ist je nach Hersteller unterschiedlich, wobei großvolumige Spiralgänge zu einem guten Bohrmehltransport führen können. Es stehen Bohrerdurchmesser von 3 bis 10 mm zur Verfügung. Die ausführbaren Bohrtiefen liegen in der Regel bei 30–40 mm und sind je nach Verfahren und Bohrergeometrie auf max. 80 mm Tiefe begrenzt.

Zu unterscheiden sind Bohrer mit keilförmiger Bohrerschneidenausformung (Bohrerspitze) und Bohrer mit plan am Objekt anliegender Bohrschneide. Die Ausbildung des Schneidenwinkels nimmt großen Einfluss auf die Schnittleistung und damit auf den Bohrfortschritt. Daher ist die exakte und reproduzierbare Schneidenausbildung wichtig für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen, die mit Bohrern gleicher Bauart erzielt werden. PKD-Bohrer sollten vor Verwendung durch Testmessungen in Bezug auf ihr Schneidverhalten klassifiziert werden.

Freiexemplar

2.1 Messprinzip A

Gerätetyp A1

Bild 2 zeigt ein Bohrwiderstandsmessgerät nach Prinzip A, bei dem eine handelsübliche Akkuschlagbohrmaschine auf einem beweglichen Schlitten in ein Gehäuse integriert ist (siehe auch Anhang). Die Bohrmaschine wird mit Hilfe eines Seilzuges, an dessen Ende ein Gewicht angehängt wird, mit konstanter Kraft an die Oberfläche gedrückt und der Bohrer in das zu prüfende Material vorgetrieben. Ein X/Y-Schreiber mit einem am Seilzug befestigten Stift registriert bei konstantem Papiervorschub die Eindringtiefe des Bohrers als Funktion der Zeit.



Bild 2 Gerätetyp A1 (DURABO) in Messposition

Üblicherweise finden Hartmetallbohrer mit Spezialschliff oder PKD-Bohrer mit einem Durchmesser von 3 mm Verwendung. Je nach Messaufgabe können Hartmetallbohrer bis 10 mm Dicke eingesetzt werden.

Zur Anpassung an das jeweilige Material können die folgenden Geräteparameter verändert werden: 2 Drehzahlen, 2 Papiertransportgeschwindigkeiten, unterschiedliche Anpressdrücke. Erfahrungsgemäß wird an harten, porösen Materialien (z. B. Sandstein) vorteilhaft im Schlagbohrmodus mit Hammerschneide gebohrt, an weichen Materialien bewährt sich unter Umständen schlagloses Drillbohren. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus Bohrungen mit den beiden Modi ist nicht möglich. Darüber hinaus können Ergebnisse, die mit unterschiedlichen Geräten dieses Typs gewonnen wurden, nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden (Kleinstserien, Einzelanfertigungen, Produktverbesserungen).

Ziel der Auswertung ist, aus der Bohrfortschrittskurve (XY-Plot, Beispiel Bild 3) ein aussagekräftiges Bohrwiderstands-Tiefenprofil zu erhalten. Generell gilt, je steiler die Rohkurvensteigung, desto niedriger ist der Bohrwiderstand.

Die Beispielskurve zeigt drei Abschnitte mit unterschiedlichem linearem Anstieg, die im realen Gestein unterschiedlich festen, aber in sich homogenen Zonen entsprechen würden (A: stark verwittert bis 10 mm Tiefe, B: wenig verwittert bis 20 mm Tiefe, C: unverwittert).

Abhängig von der gerätespezifischen Schreibergeschwindigkeit (mm/s), die zuvor ermittelt werden muss, entsprechen die Abschnitte (mm) auf der x-Achse definierten Zeitintervallen (s). Bei der üblichen Auswertung werden der Rohkurve abschnittsweise die Wertepaare für den Papiervorschub und die Bohrtiefe entnommen. Die entsprechenden Bohrzeiten werden berechnet und durch die zugehörige Bohrtiefe dividiert. Dieser Quotient in s/mm wird als Bohrwiderstand bezeichnet.

Bei großen Wertedifferenzen im Tiefenprofil kann anstelle des Bohrwiderstands der Steigungswinke Θ (arcustangens-Wert) der Kurve des Rohplots gegen die Bohrtiefe aufgetragen werden [8]. Dies liefert anschaulichere Ergebnisse, weil die hohen Festigkeitsbereiche in ihrer Diagrammdarstellung gedämpft werden Bild 4: gepunktete Kurve, linke Ordinate).

Darüber hinaus können Korrekturrechnungen z. B. zur Berücksichtigung unterschiedlicher Belastungsstufen (1–3 kg Gewicht) durchgeführt werden.

Freiexemplar

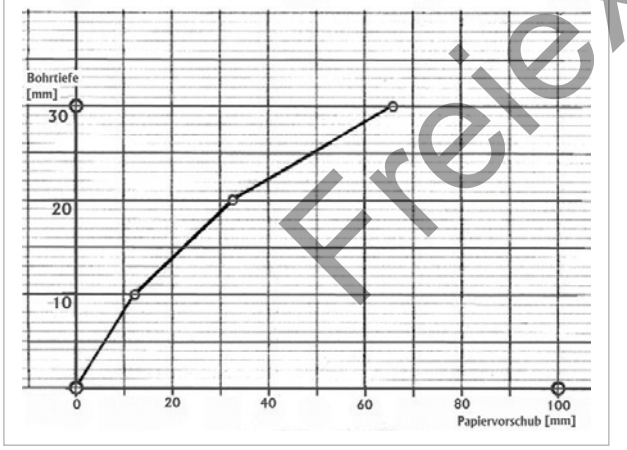


Bild 3 Beispielhafte Rohkurve des Bohrfortschrittschreibers (Gerätetyp A1) mit Auswertung in drei Abschnitten gleichbleibender Steigung. In Richtung der Abszisse entsprechen 100 mm Papier bei der gegebenen Schreibergeschwindigkeit von 2,68 mm/s einer Laufzeit von 37,3 s.

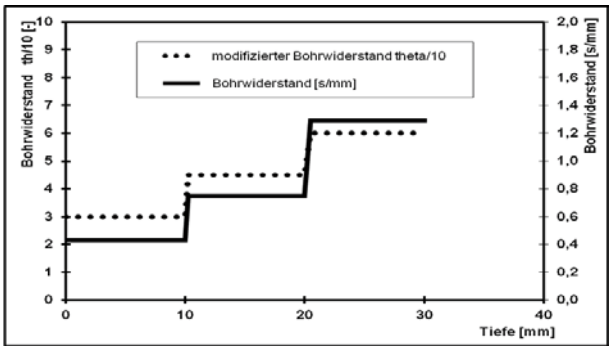


Bild 4 Zwei Möglichkeiten der graphischen Darstellung der Bohrfortschrittskurve:
durchgezogene Kurve – Auswertung in s/mm aus der Länge des Papierdurchsatzes (abhängig von der jeweiligen Schreibergeschwindigkeit)
gepunktete Kurve – Auswertung in th/10 aus der arctan-Funktion der Achsenabschnitte des Steigungswinkels th (Θ).

Gerätetyp A2

Gerätetyp A2 arbeitet ebenfalls nach Messprinzip A und ist in Bild 5 zu sehen (siehe auch Anhang). Mit Hilfe eines variabel teilbaren Andruckgewichtes von 1 bis 2,5 kg, das über einen geführten Seilzug angehängt ist, wird jeweils eine konstante Andruckkraft des Bohrers erzeugt. Die Bohrtiefe der PKD-Bohrer (3, 4 und 5 mm Durchmesser) beträgt üblicherweise 30 mm. Das Gerät ist für weiche bis mittelfeste Materialien konzipiert und arbeitet ausschließlich im Drillbohrmodus.

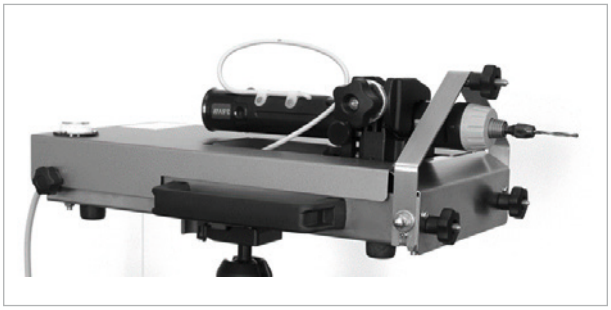


Bild 5 Ein Bohrwiderstandmessgerät mit Messprinzip A, Gerätetyp A2.

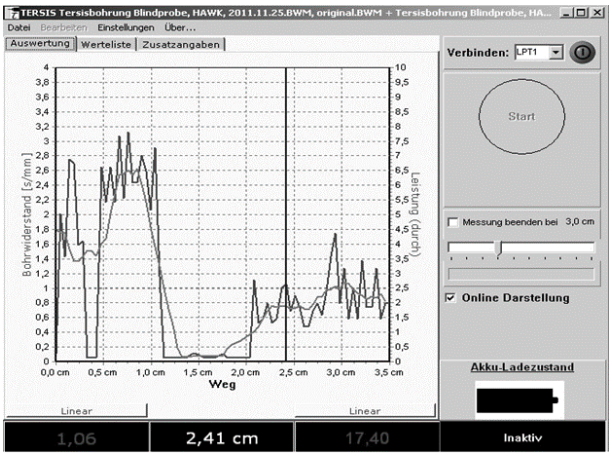


Bild 6 Mit Gerätetyp A2 ermitteltes Bohrwiderstandprofil in der Darstellung ungeglättet und geglättet.

Aus dem zeitabhängigen Bohrfortschritt wird der Bohrwiderstand als reziproke Bohrgeschwindigkeit in s/mm berechnet und bereits während der Messung kontinuierlich über der Bohrtiefe aufgetragen. Neben der Visualisierung der originalen Messwerte stehen Glättungsfunktionen zur Verfügung (Bild 6). Im Bohrwiderstandsdiagramm können maximal 2 Messkurven überlagert werden. Die Messergebnisse können als Wertepaare Bohrtiefe/Bohrwiderstand exportiert und weiterbearbeitet werden.

Gerätetyp A3

Das Gerat A3 (Bild 7) ist eine Weiterentwicklung des Gerätes A2 (siehe auch Anhang). Zusätzlich zum Funktionsumfang von Gerätetyp A2 sind bei diesem Gerät Frei-Hand-Messungen ohne Stativ und Bohrungen in beliebigen Neigungswinkeln möglich. Für die konstante Andruckkraft des Bohrers am Objekt sorgt ein Pneumatikzylinder, der durch einen netzstromabhängigen Kleinkompressor oder einen netzunabhängigen Vorratsbehälter mit CO2-Kartuschen mit Druckluft versorgt wird. Bei vertikalen oder schräg verlaufenden Bohrungen wird der Schwerkrafteinfluss durch entsprechende Nachregulierung des Luftdrucks kompensiert. Hierzu wird der gewählte Neigungswinkel über einen Neigungssensor erfasst und in der Software der einzustellende Luftdruck angezeigt (Bild 8).



Bild 7 Ansicht Bohrwiderstandsmessgerät Gerätetyp A3.

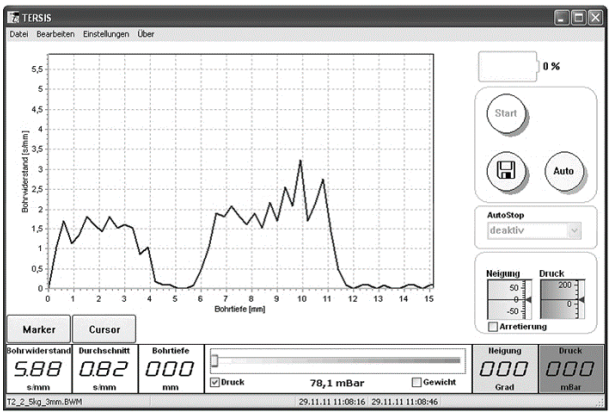


Bild 8 Ausgabemaske zum Gerät A3 nach Berechnung des tiefenabhängigen Bohrwiderstands mit vorausgewählter Einstellung des Andrucks und der Neigung.

Der stärkere Bohrmotor ermöglicht Messungen in härteren Materialien sowie die Verwendung von Bohrern mit größeren Durchmessern. Das Gerät A3 wird mit PKD-Bohrern betrieben. Die Daten zwischen Messgerät und PC werden mittels USB-Kabel oder drahtlos übertragen. Die Software stellt in Echtzeit die Bohrtiefe, den Bohrwiderstandsverlauf und den Mittelwert dar.

Freiexemplar

2.2 Messprinzip B

Derzeit ist nur ein Gerät, das nach dem Messprinzip B arbeitet, auf dem Markt verfügbar (Bild 9, siehe auch Anhang). Das Gerät B basiert auf einem handelsüblichen Akkubohrschrauber mit einer kompakten Mess- und Vorschubeinheit. Gesteuert wird das Gerät durch einen mobilen Windows-PC. Es besitzt zwei separate Motoren für Vortrieb und Rotation. Drehzahl und Vortriebsgeschwindigkeit werden vor Messbeginn festgelegt und während der Messung konstant gehalten. Die hierfür erforderliche Andruckkraft in [N] wird als Maß für den Bohrwiderstand tiefenabhängig erfasst. Bohrungen können in beliebigem Neigungswinkel, aber ausschließlich im Drillbohrmodus ausgeführt werden.



Bild 9 Ansicht des Gerätes B. (Werksfoto Fa. SINT)

Während der Messung werden folgende Größen kontinuierlich ermittelt:

- die momentane Andruckkraft [N],
- die Bohrtiefe [mm],
- die Drehzahl des Bohrers [rpm] und
- die Eindringgeschwindigkeit [mm/min]

und im Messprogramm digital angezeigt und als Diagramm dargestellt.

Das Gerät wird mit speziellen, eigens dafür angefertigten Diamantbohrern der Fa. DIABER betrieben (Ø 3, 5, 7 und 10 mm, große Bohrerdurchmesser für weiche, kleine für harte Materialien).

Bei Verwendung verschiedener Bohrerdurchmesser unter sonst identischen Parametern (Drehzahl des Bohrers und Eindringgeschwindigkeit) ist eine Vergleichbarkeit durch Umformung in einen vom Durchmesser unabhängigen Bohrwiderstand nach folgender Formel gegeben:

$$DR_i = \frac{DR_m}{l}$$

DR_i ist der vom Bohrerdurchmesser unabhängige Bohrwiderstandswert in N/mm;

DR_m ist der von dem Gerät gemessene Wert in N;

l ist die Länge der Bohrerschneide in mm (entspricht dem Durchmesser des Bohrers).

3 Messergebnis und Auswerteverfahren

3.1 Bohrwiderstand als Materialkennwert

Unverwitterte und weitgehend homogene Materialien zeigen im Bohrwiderstand meist klare, nach der jeweiligen »Härte« gestaffelte Unterschiede. So lässt sich etwa die Qualität unterschiedlicher Ziegel (Weichbrand, Normalbrand, Klinker) gut voneinander unterscheiden. Ebenso kann im direkten Vergleich der Bohrwiderstand von Putzen, Fugen- oder Steinergänzungsmörteln zur Beurteilung der Eignung im Verbund mit dem Untergrund herangezogen werden. Diese Verhältnisse werden von jedem Gerät qualitativ reproduzierbar wiedergegeben.

Darüber hinaus sind die mit den Gerätesystemen A3 und B gewonnenen Ergebnisse quantitativ und innerhalb der Geräteserien reproduzierbar. Für B (Bild 10) und A3 liegen lineare Korrelationen zwischen Bohrwiderstand und Druckfestigkeit vor.

Freiexemplar

Bei den Systemen A1 und A2 lassen sich aus den Bohrwiderstandswerten keine absoluten Materialkennwerte ableiten. Relative Unterschiede in den Festigkeiten von verschiedenen Materialien werden jedoch abgebildet. [3], [8].

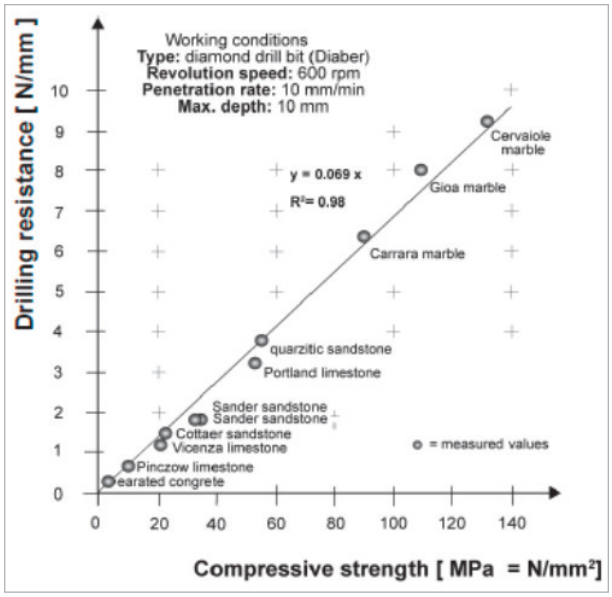


Bild 10 Die mit B ermittelten Werte des Bohrwiderstandes können Druckfestigkeitswerten zugeordnet werden. [1], [4]

3.2 Bohrwiderstandsprofil

Die tiefenabhängige Auswertung einer Bohrfortschrittskurve liefert ein Bohrwiderstandsprofil. Aus diesem lassen sich bei allen Geräten sowohl Materialwechsel als auch verwitterungsbedingte Festigkeitsschwankungen gut erkennen. Neben oberflächennahen Festigkeitsverlusten sind auch Schalen durch ihre dahinter liegende Lockerzone oder schichtungsbedingte Festigkeitsunterschiede bzw. Aufblättern detektierbar. Im direkten Vergleich mit durchgeführten Bohrwiderstandsmessungen nach erfolgter Konservierung (Steinfestigung, Schalenhinterfüllung, Steinergänzung) lässt sich die Qualität solcher Maßnahmen bewerten. Zur Nachkontrolle nach einigen Jahren Standzeit ist das Messverfahren geeignet (Monitoring).

3.3 Auflösung

Abhängig von Gerätetyp und Auswerteverfahren liegt die tiefenabhängige Auflösung der Messgeräte zwischen 0,01–1 mm. Dies ist zur Beurteilung von Schadenszuständen und Konservierungsmaßnahmen in der Regel ausreichend. Die Korngröße inhomogener Materialien sollte dabei ein Drittel des Durchmessers des verwendeten Bohrers nicht überschreiten.

3.4 Bewertung von Messergebnissen von Materialien mit grobem Gefüge

Die natürlichen Inhomogenitätsbereiche von Baustoffen (größere Gefügebestandteile wie Einschlüsse in vulkanischen Tuffen, Ton-«Lunker« in Ziegeln, Muscheln in Kalkstein, »Kalkspatzen« und gröbere Sandkörner in Mörteln etc.) erstrecken sich im Gefüge oft über mehrere Millimeter bzw. Zentimeter. Besitzen diese Bereiche eine hohe Härte (z. B. Gesteins- und Mineralfragmente, Quarzkörner), die die Bohrleistung des Gerätes übersteigt, ist eine Messung nicht möglich.

Bei prinzipiell bohrbarem Material werden mitunter Ergebnisse erzeugt, die an den Grenzen der Interpretierbarkeit liegen, weil sich die störenden Einflüsse aus dem gegebenen groben Gefüge mit den zu ermittelnden Zielgrößen (Verwitterungsprofil) überlagern. Die Eliminierung solcher Störeinflüsse kann in einigen Fällen durch besondere Datenauswertungsverfahren gelingen, doch ist dafür ein hohes Maß an Erfahrung notwendig.

Freiexemplar

3.5 Darstellung von Verwitterungsprofilen größerer Oberflächenbereiche

Ein Bohrwiderstandsprofil stellt die vorhandene Situation an einer eng begrenzten Messstelle dar. Sind an einer Materialoberfläche visuell unterschiedliche Erhaltungszustände auszumachen, müssen entsprechend mehrere Messungen durchgeführt werden. Manchmal kann die Untersuchung von Übergangsbereichen solcher Schadensmerkmale interessant sein (z. B. Ausdehnung einer Mürbzone hinter einer sich bildenden Schale). In solchen Fällen können mehrere Bohrungen in einer Linie nebeneinander angeordnet und die erhaltenen Profile in einem Flächendiagramm dargestellt werden [6]. Eine solche Darstellung hilft, das geometrische Ausmaß von Verwitterungsphänomenen einzuschätzen und diese in der Auswertung von den Störeinflüssen durch inhomogene Materialstrukturen zu trennen (s. o.).

4 Störeinflüsse und Einsatzgrenzen

Durch die Spezifik des Messverfahrens (Abschälen von mineralischem Material durch die rotierende Bewegung bzw. zusätzliche zertrümmernde Wirkung eines schlagenden Bohrers) können sich im Messergebnis besondere Einflussfaktoren bemerkbar machen. Wenige davon sind mathematisch modellierbar und können im Zuge der Datenaufbereitung entsprechend eliminiert werden. Andere Einflüsse sind jedoch unkalkulierbar und müssen bei der Ergebnisinterpretation erkannt werden, um zutreffende Aussagen zum Materialzustand treffen zu können.

Nicht zuletzt hängt die Aussagefähigkeit des Ergebnisses sehr stark vom Wartungszustand des verwendeten Gerätes ab.

4.1 Zustand des Bohrers

Das Resultat der Messung ist stark abhängig vom Zustand der Bohrerschneide. Dabei wird die anfängliche geometrische Ausbildung der Schneide durch die Fertigung bzw. den Anschliff festgelegt. Während der Messungen selbst verändert sich die Schneide durch Verschleiß, der von der Abrasivität des Prüfmaterials abhängt.

Hartmetallbohrer unterliegen bei Anwendung in abrasivem Baumaterial (z. B. Gefüge mit scharfkantigen Quarzen) einer raschen Abnutzung, die bei der Auswertung berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Abrasivität eines Materials durch dreimaliges benachbartes Bohren bis in 4 cm Tiefe zu prüfen. Da das Material in dieser Tiefe üblicherweise als quasi unverwittert zu bezeichnen ist, sollten alle drei dort das gleiche Resultat erzielen. Ein systematisches, sukzessives Ansteigen des Bohrwiderstands zeigt dagegen den abrasiven Charakter des zu prüfenden Baustoffs an. Eine rechnerische Korrektur ist möglich [5]. Darüber hinaus sollten für umfangreichere Prüfungen die Bohrer nach entsprechend kurzen Prüfintervallen gewechselt werden.

Diamantbohrer besitzen fertigungsbedingt unterschiedliche Schneidleistung. Aus diesem Grund hat es sich bewährt, die einzelnen Bohrer durch Vorprüfung an definiertem Untergrund in Gruppen einzuteilen. Vergleichende Messungen sollten dann immer nur mit jeweils einer Gruppe von Bohrern durchgeführt werden. Diamantbohrer unterliegen einem wesentlich geringeren Abrieb als Hartmetallbohrer. Dennoch verändern sich ihre Bohrerschneiden im Laufe der Zeit durch Gebrauch, so dass der Zustand dieser Bohrer in regelmäßigen Abständen an bekanntem Material zu überprüfen ist.

4.2 Bohrmehl/Feuchtigkeit

Wird der Abtransport des Bohrmehls behindert, führt dies im Bohrloch zu einer verstärkten Mantelreibung mit der Folge materialuntypischer, z. T. deutlich überhöhter Messwerte. Die Ursachen hierfür können eine größere Materialfeuchte und/oder die Erzeugung von sehr feinem Bohrmehl, etwa in stark tonmineralhaltigem, carbonatreichem oder gipshaltigem Material sein. Dieser Einfluss wirkt sich in dichten Gefügen stärker aus, da hier ein Ausweichen des Bohrmehls in den Porenraum nicht möglich ist.

Dieser Effekt ist nicht kalkulierbar und tritt offenbar bei Messungen, die im Schlagbohrverfahren vorgenommen werden (Gerätetyp A1), erst bei größeren Bohrtiefen auf als bei reinem Drillbohren.

4.3 Fehlerhafte Handhabung der Geräte

Handhabungsbedingte Störeinflüsse durch fehlerhafte Positionierung der Bohrerschneide auf der Oberfläche, mangelnde Fixierung des Gerätes während der Messung oder die Abweichung des Bohrgerätes im Laufe des Messvorgangs aus der Bohrachse, welche durch eine erhöhte Mantelreibung das Messergebnis verfälscht, sind zu vermeiden.

Freiexemplar

4.4 Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Die qualitative Vergleichbarkeit der mit den unterschiedlichen Gerätesystemen gewonnenen Ergebnisse ist gegeben: Verwitterungsprofile, Unterschiede der Bohrwiderstände von mineralischen Baustoffen und Charakteristika von groben Gefügen können die einzelnen Geräte mit gleichen Trends wiedergeben. Aufgrund der unterschiedlichen Konstruktion verschiedener Gerätefamilien sind die gemessenen Werte des Bohrwiderstandes quantitativ nicht vergleichbar.

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass Bohrer mit unterschiedlichen Geometrien der Bohrerschneide in der Messung keine übereinstimmende Werte erzeugen (Vgl. Abschnitt 4.1).

4.5 Einsatzgrenzen

Mit der Auswahl der Parameter Bohrerdurchmesser (alle Systeme), Andruckkraft (Messverfahren A) bzw. Eindringgeschwindigkeit (Messverfahren B) können die Messungen an die zu erwartende Härte des zu prüfenden Materials angepasst werden. Zusätzlich besteht bei den Geräten A1 noch die Möglichkeit der Wahl zwischen dem Schlagbohren und Drillbohren. Die Messung von sehr harten Gesteinen oder z. B. hochfestem Beton sind mit hohen Anpressdrücken grenzwertig.

Messungen an Baustoffen, bei denen ein sehr feinkörniges Bohrmehl entsteht (z. B. dichte Kalksteine, Gipse), und an Gesteinen mit einem hohen Feuchtegehalt führen durch die sich entwickelnde hohe Mantelreibung im Bohrloch zu begrenzt auswertbaren Ergebnissen.

Ferner können in weiche Grundmassen eingebettete harte Einschlüsse nicht durchdringbare Blockaden darstellen.

Mit üblichen Bohrern sind Bohrtiefen von bis zu 30 bis 40 mm möglich. Bei weichen und trockenen Materialien können unter Verwendung von Bohrern mit entsprechend langen Spiralgängen Tiefen bis 80 mm erreicht werden.

Die Messgeräte sind standardmäßig für Bohrungen in Horizontallage vorgesehen. Damit können mehr oder weniger senkrechte Oberflächen untersucht werden. Mit den Systemen A3 und B sind Messungen in einem von der Horizontalen abweichenden Winkel möglich.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mit dem Bohrwiderstand-Messverfahren steht ein wertvolles Hilfsmittel zur Verfügung, den durch Verwitterung und Konservierungsmaßnahmen veränderten Festigkeitszustand von Bauwerksoberflächen im Tiefenprofil zu erfassen und zu beurteilen. Die beschriebenen Messverfahren und Geräteausführungen liefern – bei sachgerechter Konfiguration der Geräteparameter, Durchführung der Messung und Auswertung – jeweils zuverlässig auswertbare Profile des Bohrwiderstandes von mineralischen Baustoffen.

Störfaktoren können das Messergebnis beeinflussen. Diese während des Messvorganges zu erkennen, auszuschließen bzw. bei der Datenauswertung zu beachten, setzt Erfahrung im Umgang mit dem Messgerät und in der Interpretation der Ergebnisse voraus.

Mit allen Geräten lassen sich im direkten Vergleich Materialwechsel, verwitterungsbedingte Festigkeitsschwankungen und Konservierungseinflüsse gut und mit ausreichender Auflösung erkennen. Da Geräteparameter und Gerätetyp die Messungen beeinflussen, besteht zwar keine quantitative, aber eine qualitative Vergleichbarkeit zwischen Ergebnissen, die mit unterschiedlichen Geräten gewonnen werden. Die Untersuchungen einer Messkampagne sollten nach Möglichkeit mit demselben Gerät unter jeweils gleichen Bedingungen durchgeführt werden. Dies gilt auch für vergleichende Wiederholungsmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten, um etwa den Erfolg einer Konservierungsmaßnahme zu prüfen, den Fortschritt eines Verwitterungsprozesses oder die Langzeitwirksamkeit einer Konservierungsmaßnahme zu verfolgen.

Freiexemplar

6 Literatur

[1] Delgado Rodriques, J.; Costa, D. A new method for data correction in drilling resistance. Tests for the effect of drill bit wear. Int. J. Restoration of Buildings and Monuments, 10: 1–18, Zürich, 2004

[2] Geotron-Elektronik http://www.geotron.de/tl_files/geotron/media/Informationen/Korrelation.pdf, abgerufen am 27.04.2017

[3] Leonhardt, H.; Lukas, R.; Kießl, K. Handgerät zur vereinfachten Vor-Ort-Bestimmung bauphysikalischer Kennwerte von Gesteinsoberflächen. – Jahresbericht Steinzerfall-Steinkonservierung 1989: 243–254, Berlin, 1991

[4] Pamplona, M.; Kocher, M.; Snethlage, R.; Aires-Barros, L. Drilling Resistance: Overview and Outlook. – Z. dt. Geowiss., 158/3, p. 665–676, 2007

[5] Pfefferkorn, S. Untersuchungen zur Abschätzung des Einflusses des Bohrerverschleißes auf das Ergebnis von Bohrwiderstandsmessungen. Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 4. Jahrg., 467–478, 1998

[6] Pfefferkorn, S. Beurteilung von Verwitterungserscheinungen an Natursteinoberflächen mit dem Bohrwiderstand-Messverfahren. In: Siegesmund, S.; Auras, M.; Snethlage, R. (Hg.): Stein – Zerfall und Konservierung, S. 155–159, 2005

[7] Tiano, P. et al. Deliverable 6 – Handbook of rock categories. – In: The European Commission Project ACOUTHERM – (GFD3-2001-60001) Effects of the weathering on stone materials: assessment of their mechanical durability (McDUR), 2002

[8] Wendler, E.; Sattler, L. Bohrwiderstandmessung als zerstörungsarmes Prüfverfahren. In: Wittmann, F. H., Gerdes, A. (Hrsg.): Proc. 4. Intern. Koll. Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen (MSR IV'96): 145–159, Esslingen, 1996

Freiexemplar

7 Anhang

Vergleichsparameter Bohrwiderstandsmessgeräte (Stand 3.7.25)

		derzeit im Einsatz befindliche Bohrwiderstandsmessgeräte (Messprinzip und Gerätetyp gem. WTA-Merkblatt)			
Merkmale	**Bemerkung**	**DURABO I bis III (Gerät A1)**	**TERSIS 1 (Gerät A2)**	**TERSIS 2 (Gerät A3)**	**DRMS cordless (Gerät B1)**
Masse des Gerätes		ca. 4,3 kg incl. Akku zzgl. Gewicht für Andruckkraft	5,1 kg incl. Akku zuzügl. Gewicht für Andruckkraft	5,5 kg	5,3 kg incl. Akku
Gehäuse	Gehäuseform	prismatisch, vorne offen	prismatisch mit aufgesetzter Antriebseinheit	geschlossener Zylinder	Akkuschrauber
	Abmessungen Gehäuse (L/B/H)	ca. 40 / 20 / 20 cm	ca. 40 / 30 / 15 cm	ca: Ø 14 cm, L = 50 cm	43 / 30 / 12,5 cm (L*B*H)
zusätzlich erforderliche Geräte		Stativ	Stativ Laptop / Tablet	Stativ Laptop / Tablet Kompressor oder Druckluftflasche	Stativ Laptop / Tablet
Anforderung an das Betriebssystem			Windows XP oder höher	Windows XP oder höher	Windows XP oder höher
Bedienung	am Bohrgerät	6 Bedienungselemente: Ein / Aus Schalter (Motor) Drehzahl (1./ 2. Gang) Drill-/Schlagbohren Ein / Aus Schalter (Schreiber) Schreibertempo (1. / 2. Gang) Masse des Gewichtssatzes	4 Bedienungselemente: Ein / Aus Schalter (Motor) Drehzahl (1. / 2. Gang) Drehmoment (Bohren) Masse des Gewichtssatzes	2 Bedienungselemente: Ein / Aus Schalter (Motor) Vor-/Rücklauf (Druckluft)	3 Bedienungselemente: Ein / Aus Schalter Vor- / Rücklauf 1. / 2. / 3. Gang
	in der Software	-	3 Bedienungselemente: Start / Stop Messdauer online/offline-Darstellung	3 Bedienungselemente: Start / Stop Messdauer Luftdruck / Anpresskraft	Start / Stop Bohrtiefe Drehzahl (20-1000 U/min) Eindringgeschwindigkeit (1-80 mm/min)
Messprinzip	konstante Parameter:	Anpresskraft, Drehzahl	Anpresskraft, Drehzahl	Anpresskraft, Drehzahl	Eindringgeschwindigkeit, Drehzahl
	Messgröße:	Eindringgeschwindigkeit	Eindringgeschwindigkeit	Eindringgeschwindigkeit	Andruckkraft
Anpresskraft	Realisierung durch	Gewichte 1 kg, 2 kg, 3 kg	Gewichte 1 kg, 1,5 kg, 2 kg, 2,5 kg	Pneumatic - Zylinder, stufenlos 100 - 600 mbar	E - Motor
	Abstufungen	ca. 10, 20, 30 N	ca. 10, 15, 20, 25 N	stufenlos 5 - 50 N	stufenlos 0 - 100 N
Nenndrehzahl Bohrmaschine		geräteabhängig: 330 und 900 U/min 350 und 1000 U/min	200 oder 600 U/min	600 U/min	stufenlos 20 bis 1000 U/min
Bohrmodus	Drillbohren (ohne Schlag)	ja	ja	ja	ja
	Schlagbohren	ja	nein	nein	nein
Lagerung des Bohrschlittens/ Vorschubgestänges*		geräteabhängig auf Schienen mit Gleitlagern, Kugellager oder Rollen	kugelgelagerte Linearführung	kugelgelagerte Linearführung	Gleitlager
Anlaufwiderstand des Bohrschlittens		ca. 2,5 N	1,0 N	1,0 N	-
Datenaufnahme		analog (Papierschreiber)	digital	digital	digital
Auflösung der Daten		-	11 bit	12 bit	12 bit
Vorschubgeschwindigkeit des Schreiberpapiers / Abtastrate		ca. 2,7 oder 5,5 mm/s	35 samples/s	40 samples/s	-
Ortsauflösung über der Bohrtiefe		0,5 mm bis 1 mm	0,38 mm	0,3 mm	0,1 mm oder kleiner (Minimum 0,006 mm)
geräteabhängige Messunsicherheit des Bohrwiderstands		k. A.	± 10 %	± 10 %	± 1 N
Bohrertyp	(Hersteller)	PKD-Diamant oder Hartmetall (nicht festgelegt)	PKD-Diamant (LACH)	PKD-Diamant (LACH)	PKD-Diamant (DIABER)
Bohrergröße	vom Gerätehersteller empfohlen	PKD Ø 3 mm Hartmetall Ø 3 - 12 mm	Ø 3 mm bis 5 mm	Ø 3 mm bis 85 mm	Ø 3, 5, 7 und 10 mm
maximale Bohrtiefe	bohrerabhängig	ca. 40 mm bei Ø 3 mm ca. 80 mm bei Ø 5 mm	ca. 30 mm bei Ø 3 mm	ca. 30 mm bei Ø 3 mm ca. 80 mm bei Ø 85 mm	ca. 30 mm bei Ø 3 mm ca. 50 mm bei Ø 5 mm ca. 70 mm bei Ø 7 mm
Einsatzmöglichkeit (vert./horizont.)		nur horizontal	nur horizontal	beliebig	beliebig
Frei - Hand Einsatz möglich		ja, aber nicht empfohlen	nein	ja	ja, aber nicht empfohlen
prüfbare Materialien (Härtebereiche)		weich bis hart	weich bis mittelhart	weich bis hart	weich bis hart
Akku - Betriebsspannung		9,9 Vdc oder 9,6 Vdc (geräteabhängig)	3,6 Vdc	10,8 Vdc	14,4 Vdc alternativ mit Netzteil
ca. Akku - Laufzeit		30 min	20 min	30 min	30 min
gerätetypische Störeinflüsse		Drehzahlabweichungen, Störungen im Papiertransport, unregelmäßiger Gleitwiderstand über den Schlittenweg	Drehzahlabweichungen		
notwendige Wartungsarbeiten		Reinigung von Bohrmehl, Kontrollarbeiten: Gleitwiderstand über den Schlittenweg, Konstanz des Papiertransports, Drehzahl des Antriebs	Reinigung von Bohrmehl (innen und außen), Kontrolle der Seilführung und der Drehzahl des Antriebs	Reinigung von Bohrmehl (innen und außen)	Reinigung von Bohrmehl (außen)
Bauzeit ab		1991/1998	2004	2012	1998/2005
Hersteller		Leonhardt Vertriebs GmbH Vagen, Deutschland	GEOTRON-ELEKTRONIK Pirna, Deutschland	GEOTRON-ELEKTRONIK Pirna, Deutschland	SINT Technology Florenz, Italien

Freiexemplar

Die Geräte A1, A2 und A3 sind nicht mehr in Produktion. Existierende Geräte werden jedoch nach wie vor genutzt.