



Bild 1: Messmaschine aus Hartgestein, Maschinenbett der Firma Fooke aus Nanodur-Beton.

Bild: Ducrete



# MATERIALAUSWAHL FÜR MASCHINENBETTEN

Im Rahmen eines Projekts wurden umfangreiche **Untersuchungen zum Kriechverhalten** unterschiedlicher Materialproben durchgeführt. Ziel war, die Verformungsstabilität von Bauteilen aus Nanodur-Beton gegenüber alternativen Werkstoffen wie Naturhartgestein und Polymerbeton zu charakterisieren.

**Christian Brecher, Bernhard Sagmeister, Marcel Fey und Florian Kneer**

**M**aschinenbetten sind die tragenden und stützenden Elemente einer Werkzeugmaschine und werden hauptsächlich aus Stahl, Stahlguss oder Grauguss hergestellt. Sie tragen und führen einzelne Funktionselemente. Ihre Größe und Gestalt hängt im Wesentlichen von der geforderten Prozessaufgabe ab. Ihre Form wird maßgeblich durch die Lage und Länge der Bewegungsachsen festgelegt. Infolge technischer und wirtschaftlicher Anforderungen an Werkzeugmaschinen haben sich im Laufe der letzten 30 Jahre neben Maschinenbetten aus Grauguss zusätzlich Gestellbauteile aus Werkstoff-

fen wie Mineralguss oder epoxidgebundenem Polymerbeton etabliert. [1]

Neben den fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bei der Auswahl geeigneter Werkstoffe spielen die mechanischen Eigenschaften eine wesentliche Rolle, da sie maßgeblich die Bauteileigenschaften bestimmen. Diese sind unter anderem die Festigkeit, das spezifische Gewicht, der Elastizitätsmodul, die Materialdämpfung, die Härte und das thermische Verhalten. Eine Langzeit-Geometrie Konstanz, also ein nur minimales Kriechen nach Aufbringen einer Last, wird von allen Werkstoffen als unab-

dingbare Voraussetzung erwartet. Ist dies nicht gegeben, verlieren die Führungsbahnen im Laufe der Zeit die Ebenheit und Parallelität, welche in aufwendiger und teurer Präzisionsbearbeitung hergestellt worden ist. Der Einsatz in Präzisionsmaschinen oder Messmaschinen wie Koordinatenmessgeräten muss dann infrage gestellt werden.

Stahl und Guss sind am höchsten belastbar, aber bei der Herstellung sehr energieaufwendig und teuer. Werkstoffe wie Polymerbeton, zementgebundener Beton und Naturstein hingegen sind aufgrund ihres günstigeren Preises verbreitet. Vor allem bei Hochleistungsmaschinen werden diese Werkstoffe wegen des deutlich besseren Dämpfungsverhaltens und der größeren Wärmeträgheit gezielt eingesetzt und verbessern die Genauigkeit der Maschine.

### QUALIFIKATION VON NANODUR-BETON

Zur Qualifikation von zementgebundenem Nanodur-Beton als Gestellbaustoff wurden 90 Tage andauernde Versuche zum Kriechen durchgeführt, um die ausreichende Langzeit-Geometriekonstanz nachzuweisen. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden parallel Probenkörper aus handelsüblichem Naturhartgestein und epoxidharzgebundenem Polymerbeton untersucht.

Unter „Kriechen“ wird eine plastische, zeitabhängige Verformung unter Last verstanden. Werden mineralische Körper mit einer Druckkraft beaufschlagt, verformen sie sich elastisch. Wird der Körper nicht direkt entlastet, kommt es zu einer zusätzlichen zeitabhängigen, plastischen Verformung des Betonkörpers. Das Material entzieht sich der aufgeprägten

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Dr.-Ing. Marcel Fey und Florian Kneer, M. Sc. RWTH, arbeiten im Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, Abteilung Maschinentechnik – Gruppe Maschinenuntersuchung und -beurteilung, Cluster Produktionstechnik in 52074 Aachen, Tel. (02 41) 80-2 62 83, [fkneer@wzl.rwth-aachen.de](mailto:fkneer@wzl.rwth-aachen.de), [www.wzl.rwth-aachen.de](http://www.wzl.rwth-aachen.de); Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister ist Geschäftsführer der Ducrete GmbH in 65549 Limburg an der Lahn, Tel. (0 64 31) 5 84 03 76, [info@ducrete.de](mailto:info@ducrete.de)

Druckkraft durch Kriechen. Bei Stahl unter Zugbeanspruchung kommt es zu ähnlichen Effekten und man spricht dort von Relaxation. Neben dem Alter des Probekörpers bei Belastungsbeginn hängt das Kriechen der Werkstoffe auch von Höhe und Dauer der Belastung sowie den umgebenden Klimabedingungen ab. Da das Kriechen von der mechanischen Belastung abhängt, hat es sich bewährt, das Verhalten mit der Kriechzahl  $\varphi$  zu charakterisieren. Sie zeigt an, um wie viel sich die elastische Verformung infolge Kriechens verstärkt. Eine Kriechzahl von  $\varphi = 1,0$  bedeutet eine Verdopplung der elastischen Verformung infolge Kriechens, ein  $\varphi = 0,1$  eine 10 % Erhöhung der elastischen Verformung.

Der verwendete Nanodur-Beton E45 entspricht in seiner Zusammensetzung und Herstellung der in [2] detailliert beschriebenen Standardmischung ohne Fasern. Proben ohne Wärmebehandlung (ohne WB) wurden vier Wochen im Klimaraum gelagert, bevor sie zur Prüfung ausgeliefert wurden. Proben mit Wärmebehandlung (mit WB) wurden kurz nach dem Entformen für zwei Tage auf circa 80 °C erhitzt. Der chemische Erhärtungsprozess wird dadurch beschleunigt und abgeschlossen und die Formstabilität erhöht.

Das Naturhartgestein stammte von einem anerkannten deutschen Präzisionsbetrieb der Messmittelindustrie. Der epoxidharzgebundene Mineralguss mit runder Quarzkörnung stammt aus der Güteprüfung eines anerkannten Herstellers.

Alle geprüften Platten wurden mit einer Prüfmitelsäge aus Prismen der Größe 160 mm × 40 mm × 40 mm herausgesägt und bis zur jeweiligen Prüfung im Klimaraum bei den unten angegebenen Temperaturen vorgelagert.

### PRÜFSTAND UND VERSUCHSPLAN

Zur Bestimmung der Langzeit-Geometriekonstanz wurde ein Prüfstandskonzept erarbeitet, mit dem die erwarteten minimalen Verformungen messtechnisch erfasst werden können und die Last in Höhe und Dau-

Bild 2: Proben der unterschiedlichen Materialien.

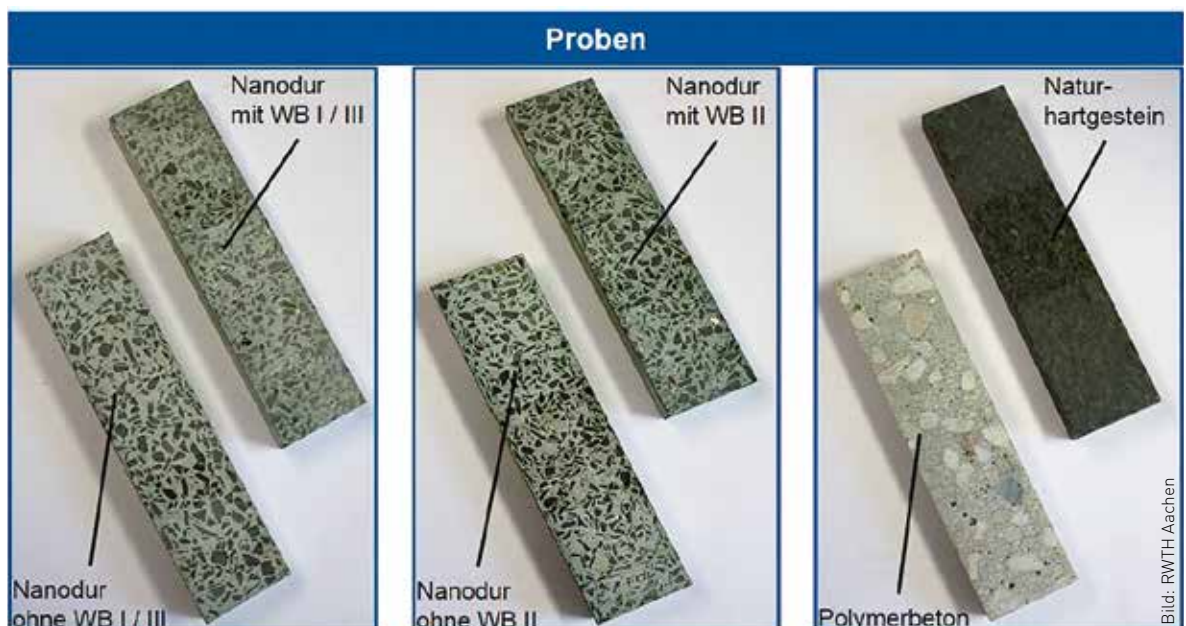


Bild 3: Der Prüfstand als CAD-Prinzipskizze (links) und real.

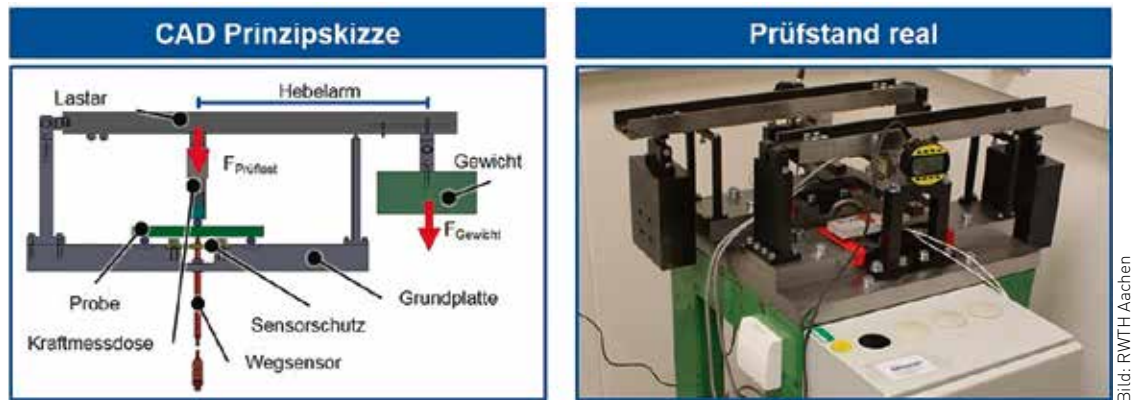
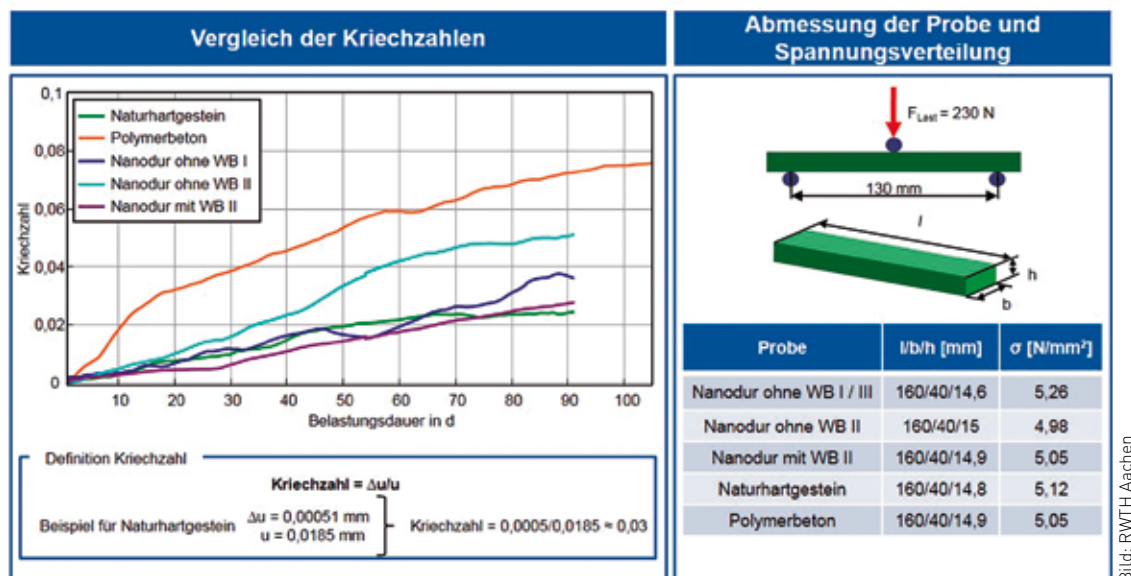


Bild 4: Ergebnisse der Messreihen.



er konstant bleibt. Neben dieser Anforderung wurden folgende zusätzlichen Randbedingungen definiert:

- Prüfstand in Anlehnung an die DIN 51290-3 [3] zur Durchführung von 3-Punkt-Biegeversuchen,
- Prüfbetrieb in einem klimatisierten Raum mit maximaler Temperaturschwankung von  $\pm 1,5 \text{ K}$ ,
- Schwankung der relativen Luftfeuchtigkeit von  $\pm 10$  und  $15 \%$  zwischen den Messreihen,
- konstante Lastaufbringung von  $230 \text{ N}$  über mindestens 90 Tage,
- Probengröße:  $160 \times 40 \times 15$  ( $l/b/h$ ) in mm.

Um die Versuchszeit gering zu halten, wurde der Prüfstand so ausgelegt, dass zwei Proben parallel untersucht werden können. Dazu wurde das in Bild 3 dargestellte CAD-Modell zweimal gefertigt und auf einer Grundplatte montiert.

Die Proben sind, wie in der DIN 51290-3 [3] zur Durchführung von 3-Punkt-Biegeversuchen gefordert, über drei Zylinderstifte gelagert. Über den Hebelarm, an dem das konstante Gewicht ( $F_{\text{Gewicht}}$ ) montiert ist, wird die Last von  $230 \text{ N}$  auf die Probe aufgebracht. Das Gewicht erzeugt je nach Probengeometrie eine Spannung von  $4,92$  bis  $5,26 \text{ N/mm}^2$ . Zwischen Hebelarm und Probe ist zur Kontrolle der Last eine Kraftmessdose montiert. Über einen Zylinderstift wird die Linienlast in die Probe geleitet. Die Probe wird über zwei Zylinderstifte im Abstand von  $130 \text{ mm}$  gelagert. Mittig unterhalb der Probe in einer Ebene mit der Last

befindet sich ein Wegsensor mit integriertem linearem Glasmaßstab.

Der Glasmaßstab zeichnet sowohl die initiale Verlagerung bei Lastaufbringung als auch die Verlagerung beziehungsweise das Kriechen der Probe in Lastrichtung über die Versuchsdauer auf.

### KLEINSTE VERLAGERUNGEN MESSEN

Der Sensor hat einen Messbereich von  $12 \text{ mm}$  und eine Auflösung von  $0,1 \mu\text{m}$ . Er kann bereits kleinste Verlagerungen messen. Die Messwerte des Wegsensors werden mithilfe eines Messsystems kontinuierlich aufgezeichnet. Dabei wird alle  $10 \text{ s}$  ein Messwert geschrieben, der für die spätere Auswertung genutzt wird. Neben dem linearen Glasmaßstab wird zusätzlich ein zweites, redundantes Wegmesssystem in Form einer Messuhr verwendet. Diese dient zur Kontrolle des linearen Glasmaßstabs. Die eingesetzte Messuhr hat einen Messbereich von  $1,8 \text{ mm}$  und eine Auflösung von  $0,5 \mu\text{m}$ . Diese ist, wie in Bild 3 rechts zu sehen, oberhalb der Probe in Lastrichtung angebracht. Sie misst nicht direkt auf der Probe, sondern auf einer Traverse, die mit der Wägezelle verschraubt ist und im Kraftfluss liegt.

Zusätzlich zur Verlagerung werden die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet. Zur Kontrolle der Temperatur werden oberhalb und unterhalb der Probe PT-100-Thermoelemente appliziert. Sowohl

die Temperatur als auch die Luftfeuchtigkeit werden über die gesamte Versuchsdauer automatisch alle 10 s aufgezeichnet.

**UNTERSCHIEDE IN DER ANFANGSDURCHBIEGUNG**

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 4 dargestellt. Im Diagramm auf der linken Seite sind die Kriechzahlen zu sehen. Auf der rechten Seite sind die Abmessungen der Proben sowie die Spannungsverteilungen aufgelistet. Bei der Anfangsdurchbiegung (Bild 5) zeigen sich deutliche Unterschiede, welche auf die unterschiedlichen E-Moduln der Materialien zurückzuführen sind. Alle Proben zeigen über die Versuchsdauer Kriechverhalten. Deutlich zu erkennen ist, dass die Polymerbetonprobe gegenüber den anderen Proben ein erhöhtes Kriechen zeigt. Etwas günstiger verhält sich der Nanodur-Beton ohne Wärmebehandlung. Demgegenüber kriecht die Nanodurprobe mit Wärmebehandlung ähnlich wie Naturhartgestein, die geringen Abweichungen liegen im Bereich der Messungenauigkeit der Sensoren. Bild 5 zeigt die auf 90 Tage normierte Auswertung der Versuche.

Es wurde ein Dauerprüfstand entwickelt, mit dem in einem Klimaraum über mehrere Monate bei konstanter Belastung Verformungen von unter 0,001 mm gemessen werden konnten. Bei vergleichenden Untersuchungen von massiven Werkstoffen zeigte sich, dass das untersuchte Naturhartgestein absolut die geringsten zeitabhängigen Verformungen aufweist. Die Langzeitstabilität (Kriechzahl) von wärmebehandeltem, zementgebundenem Nanodur-Beton ist in einer vergleichbaren Größenordnung. Nicht wärmebehandelter, normal gelagerter Nanodur-Beton verhält sich ungünstiger. Mit Kunstharz gebundener Mineralguss zeigt die höchsten Verformungen, sowohl bei den kurzzeitigen elastischen Verformungen als auch bei den zusätzlichen plastischen Verformungen infolge Kriechens.

Material	Anfangsdurchbiegung u bei Lastaufbringung [mm]	Kriechverformung Δu nach 90 Tagen [mm]	Kriechzahl φ = Δu/u im Belastungsalter von 90 Tagen
Polymerbeton	0,0440	0,0032	= 0,07
Naturhartgestein	0,0185	0,0005	= 0,03
Nanodur ohne WB I	0,0222	0,0009	= 0,04
Nanodur ohne WB II	0,0265	0,0015	= 0,05
Nanodur mit WB II	0,0286	0,0009	= 0,03

Bild: RWTH Aachen

Bild 5: Übersicht der Auswertung.

deltem, zementgebundenem Nanodur-Beton ist in einer vergleichbaren Größenordnung. Nicht wärmebehandelter, normal gelagerter Nanodur-Beton verhält sich ungünstiger. Mit Kunstharz gebundener Mineralguss zeigt die höchsten Verformungen, sowohl bei den kurzzeitigen elastischen Verformungen als auch bei den zusätzlichen plastischen Verformungen infolge Kriechens.



**LITERATUR**

- [1] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen – Maschinenarten und Anwendungsbereiche. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2005, ISBN 3-540-22504-8.
- [2] Sagmeister, B.: Maschinenteile aus zementgebundenem Beton. DIN, Beuth Verlag, Berlin 2017, ISBN 978-3-410-27186-4.
- [3] DIN 51290-3: Mai 1991. Prüfen von Reaktionsharzbeton im Maschinenbau, Prüfung gesondert hergestellter Probekörper (zurückgezogen).

## Maschinenbetten für Großwerkzeugmaschinen

aus schwingungsdämpfenden und thermisch trägen UHPC

bis 100 Tonnen möglich

inkl. Konstruktion und FEM-Berechnung

inkl. Präzisionsbearbeitung wie Fräsen und Schleifen

inkl. Sondertransporte

**durcrete**  
Maschinenbauteile und Elemente aus Ultra High Performance Concrete UHPC

durcrete GmbH | Am Renngraben 7 | D-65549 Limburg/Lahn | info@durcrete.de | www.durcrete.de